

تطور علم الطبيعة

تحول الآراء من المبادئ الأولى إلى نظرية النسبية والكمات

تأليف

ألبرت أينشتاين

٦

ليوبولد إنفلد

ترجمة

الدكتور عطية عبد السلام عاشور

المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

الدكتور محمد عبد المقصود النادى

المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور محمد مرسى أحمد

الأستاذ بكلية العلوم بجامعة القاهرة



ملتزم الطبع والنشر

مكتبة الأنجلو المصرية

١٦٥ شارع محمد بك فريد (عماد الدين سابقا)

تطور علم الطبيعة

تحول الآراء من المبادئ الأولى إلى نظرية النسبية والكمات

تأليف

ألبرت أينشتاين

٦

ليوبولد إنفلد

ترجمة

الدكتور عطية عبدالسلام عامر

المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

الدكتور محمد عبدالمقصود النادى

المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور محمد مرسى أحمد

الأستاذ بكلية العلوم بجامعة القاهرة



مكتبة الطبع والنشر

مكتبة الأنجلو المصرية

١٦٥ شارع محمد بك فريد (عماد الربيع سابقا)

مقدمة

من حق القارىء قبل أن يشرع فى قراءة الكتاب أن يتوقع الإجابة على بعض الأسئلة البسيطة كأن يعرف مثلاً الغرض من وضع هذا الكتاب والمستوى المطلوب فى القارىء كي يتمكن من فهمه . .

من العسير أن نبدأ بالإجابة على هذين السؤالين بطريقة واضحة مقنعة ، ولعله قد يكون من الأسر أن نجيب عليها فى نهاية الكتاب ، على الرغم من أن ذلك يكون غير ذى قيمة عندئذ . ولعلنا نجد من الملائم بيان الأمور التى نهدف إليها بوضع هذا الكتاب . فنحن لم نقصد وضع كتاب فى علم الطبيعة ، ولن يجد القارىء هنا دراسة منظمة للحقائق والنظريات الأولية لهذا العلم . وكان غرضنا الأساسى أن نضع الخطوط الرئيسية لمحاولات العقل البشرى إيجاد الارتباط بين عالم الأفكار وعالم الظواهر . وقد حاولنا أن نبين القوى الفعالة التى تدفع العلم إلى ابتكار الأفكار التى تناظر حقائق عالما . ولكن كان من الواجب أن تكون دراستنا بسيطة وكان علينا أن نشق لأنفسنا خلال الحشد الكبير من الحقائق والآراء الطريق الذى يبدو لنا أكثر أهمية وذو معنى واضح . وقد اضطررنا إلى إهمال الحقائق والنظريات التى لا تقع فى هذا الطريق . وكان حتماً علينا لتحقيق هدفنا العام أن نحدد اختيار الحقائق والآراء التى سندرسها . ويجب ألا يؤثر عدد الصفحات المخصصة لدراسة موضوع ما فى الحكم على أهمية هذا الموضوع . وقد تركنا جانباً بعض اتجاهات الفكر الأساسية ولم يكن تركنا لها ناتجاً عن عدم أهميتها ، بل لأنها لا تقع فى الطريق الذى اخترناه .

وقد تناقشنا طويلاً حين شرعنا فى وضع هذا الكتاب فى الميزات التى يجب أن تتوفر فى قارئنا المثالى وشغلنا كثيراً بهذا الموضوع . وقد تخيلنا أن القارىء

سيستعيز عن عدم درايته التامة بعلمى الطبيعة والرياضة ، بالتحلى بكثير من
الخصائل الحميدة . فمثلا تخيلناه مهتما بالآراء الطبيعة والفلسفية ، وكان علينا أن
نعجب بصبره الذى استعان به فى تتبع الفقرات المملة والصعبة . وتخيلنا هذا
القارى يفتننا بأنه لكى يفهم أية صفحة يجب عليه أن يقرأ الصفحات السابقة
بعناية ، فهو يعلم أن من الخطأ أن يقرأ الكتاب العلمى حتى ولو كان مبسطاً بنفس
الطريقة التى تقرأ بها القصص .

هذا الكتاب هو محادثة بسيطة بين القارى وبيننا وقد يجد القارى هذا
الكتاب منفراً أو محبباً إلى النفس ، مملاً أو مثيراً للاهتمام ولكن هدفنا يتحقق
إذا نجحت هذه الصفحات فى إعطاء القارى فكرة ما عن الجهاد الشاق للعقل
البشرى المبكر فى سبيل فهم شامل للقوانين التى تتحكم فى الظواهر الطبيعية .

ألبرت أينشتاين

ليوبولد إنفلد

فهرس الكتاب

صفحة

الباب الأول

نشأة وجهة النظر الميكانيكية

١	القصة الفامضة الكبرى
٣	الدليل الأول
٨	الكميات المتجهة
١٣	نظر الحركة
٢٣	يبقى دليل آخر
٢٦	نظرية السبال للحرارة
٣٣	عربة الملامى
٣٦	نظام التحويل
٣٩	الأساس الفلسفى
٤٢	نظرية الحركة للمادة

الباب الثانى

تداعى وجهة النظر الميكانيكية

٤٩	المائتان الكهربائيان
٥٨	المائتان المغناطيسيان
٦١	الصعوبة الجديدة الأولى
٦٦	سرعة الضوء
٦٨	النظرية الجسبية للضوء
٧٠	لغز اللون
٧٤	ماهى الموجة ؟

صفحة	
٧٧	النظرية الموجية للضوء
٨٤	هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة ؟
٨٦	الأثير ووجهة النظر الميكانيكية
٨٨	تلخيص

الباب الثالث

المجال — النسبية

٨٩	المجال كوسيلة لتمثيل الواقع
٩٨	دعامتا نظرية المجال
١٠١	واقعية المجال
١٠٧	المجال والأثير
١٠٩	السقالة الميكانيكية
١١٨	الأثير والحركة
١٢٩	الزمن والمسافة والنسبية
١٤١	نظرية النسبية والميكانيكا
١٤٦	متصل الزمان والمكان
١٥٤	النسبية العامة
١٥٩	خارج وداخل المصعد
١٦٥	الهندسة والتجربة
١٧٥	النسبية العامة وتحقيقها
١٨٠	المجال والمادة
١٨٢	تلخيص

الباب الرابع

الكلمات

١٨٤	الاتصال وعدم الاتصال
١٨٦	الكلمات الأولية للمادة والكهرباء

صفحة	
١٩٠	كمات الضوء
١٩٦	الطيف الضوئي
٢٠١	أمواج المادة
٢٠٦	أمواج الاحتمال
٢١٧	علم الطبيعة وحقيقة الوجود
٢٢٠	الخلاصة

قائمة باللوحات

٤٦	اللوحة الأولى : حركة براون
٨٣	اللوحة الثانية : حيود الضوء
	اللوحة الثالثة : خطوط الطيف — حيود الأشعة السينية والأمواج
٢٠٠	الكهربائية

الباب الأول

نشأة وجهة النظر الميكانيكية

[القصة الغامضة الكبرى — الدليل الأول — الكميات المنهجية —
لغز الحركة — يبقى دليل آخر — نظرية السيل للحرارة — صيغة الملامى —
نظام التحويل — الأساس الفلسفى — نظرية الحركة للمادة] .

القصة الغامضة الكبرى :

توجد الألغاز البولييسية الكاملة فى الخيال . وتحتوى مثل هذه الألغاز على جميع الأدلة الضرورية التى تجعلنا نكون نظريتنا الخاصة للحالة . وإذا تتبعنا سلسلة حوادث القصة بدقة فإننا نصل إلى حلها الكامل مباشرة قبل كشف المؤلف عنه فى نهاية الكتاب . والحل فى ذاته ، على عكس الحالة فى الألغاز البسيطة ، لا ينجب أملنا ويظهر فى الوقت المناسب الذى نتوقعه فيه .

هل يمكن تشبيه قارئ مثل هذا الكتاب بالعلماء ، الذين استمروا خلال الأجيال المتعاقبة يبحثون عن حل لأسرار الطبيعة ؟ ورغم عدم وجود وجه لهذه المقارنة ، الشيء الذى سيضطرننا إلى تركها فيما بعد ، فإنه يوجد لها بعض الدوافع التى يمكن تعميمها وتعديلها لتسهيل مهمة العلم فى حل أسرار الكون .

ولا تزال هذه القصة الغامضة الكبرى دون حل . بل إنه لا يمكن الجزم بوجود حل نهائى لها . لقد حصلنا على الكثير نتيجة لقراءة هذه القصة ، فقد علمتنا مبادئ لغة الطبيعة ، ومكنتنا من فهم كثير من الأدلة وكانت مصدراً للسرور وإثارة الاهتمام يخفف التعب والإرهاق اللذين غالباً ما يصاحبهما تقدم العلم . ولكننا نعلم جيداً أنه بالرغم من كثرة الأجزاء التى قرئنا وفهمنا ، فإننا لا تزال بعيدين عن الحل الكامل إذا وجد ، وهو شيء بعيد الاحتمال . وفى كل مرحلة

نحاول أن نجد تفسيراً يتفق مع الأدلة المكتشفة حتى ذلك الوقت . ولقد فسرت النظريات المبنية على التجربة كثيراً من الحقائق ولكن لم يكتشف إلى الآن حل عام يتفق مع جميع الأدلة المعروفة ، وفي كثير من الأحيان بعد الاستزادة من القراءة يتضح فشل نظرية كان يظن أنها كاملة كافية ، وذلك لظهور حقائق جديدة تناقض النظرية أو يتعذر تفسيرها بها . وكلما تمادينا في القراءة كلما زاد تقديرنا لكمال تصميم الكتاب رغم أن الحل الكامل يبدو كأنه يعتمد كلما تقدمنا . وفي جميع القصص البوليسية تقريباً ، منذ قصص كونان دويل الرائعة ، يأتي وقت يكون الباحث قد جمع جميع الحقائق اللازمة لمرحلة واحدة على الأقل من مراحل المسألة التي يبحثها . وفي أغلب الأحيان تبدو هذه الحقائق غريبة متفرقة لا علاقة بينها بالمرحلة . ولكن الباحث البوليسى الخبير يعلم أنه لا يحتاج الآن إلى بحث جديد وأن التفكير البحت يقوده إلى ربط الحقائق التي جمعها ببعضها . وبجأة ، ربما أثناء عزفه على الكمان أو تدخينه لتقليونه وهو جالس في مقعد مريح تحدث المعجزة ! فبالإضافة إلى حصوله على تفسير للأدلة الموجودة يعلم أن أموراً معينة لابد وأن تكون قد حدثت . ويستطيع الآن أن يخرج ويجمع أدلة جديدة تقوى نظريته ، وذلك لأنه يعلم الآن أين يبحث عنها .

ويجب على العالم الذي يقرأ أسرار الكون ، إذا سمح لنا أن نعيد استعمال هذه العبارة البالية ، أن يجد الحل لنفسه ، وذلك لأن من المستعذر عليه أن يدير الصفحات الأخيرة للكتاب ويقرأها كما اعتاد أن يفعل قراء القصص الأخرى الذين لا صبر لهم . وفي الحالة الراهنة القارئ هو نفسه الباحث الذي يحاول أن يفسر ولو لدرجة محدودة العلاقة بين الحوادث وما تدل عليه . ولكي يحصل العالم حتى على حل غير كامل ، يجب عليه أن يجمع الحقائق غير المرتبة التي أمكنه الحصول عليها وينظمها ويجعلها مفهومة وذلك باستعمال التفكير المبدع .

وهدفنا من الصفحات القادمة ، هو وصف عام لعمل علماء الطبيعة ، ذلك العمل الذي يناظر التفكير البحت للباحث البوليسى ، وسنوجه أكثر اهتمامنا

إلى الدور الذى تلعبه الأفكار فى البحث عن أسرار الطبيعة ذلك البحث المملوء بالمغامرات .

المرحلة الأولى :

منذ بدأ التفكير الإنسانى ومحاولات قراءة القصة الغامضة الكبرى مستمرة . ولكن العلماء لم يبدأوا فى فهم لغة هذه القصة إلا منذ زمن يزيد قليلاً عن ثلاثمائة عام . ومنذ ذلك الوقت ، عصر جاليليو ونيوتن ، أخذ العلماء يسرعون فى القراءة . فتكونت وسائل البحث الدقيقة ، وطرق الحصول على الأدلة واقتفاء أثرها . ورغم حل بعض الألغاز الطبيعية فقد ظهر بعد الاستزادة من البحث أن كثيراً من الحلول سطحية ولا يسرى فى جميع الأحوال .

والحركة مسألة أساسية وفى غاية الأهمية . وقد ظلت هذه المسألة غامضة آلافاً من السنين وذلك لشدة تعقدها . وجميع الحركات التى نشاهدها فى الطبيعة مثل حركة حجر قذف فى الهواء ، أو حركة سفينة تسير فى البحر ، أو حركة عربة تدفع فى الطريق ، هى فى الحقيقة مرتبطة ببعضها أشد الارتباط . ولفهم هذه الظواهر ، نحسن أن نبدأ بأبسط الحالات الممكنة ثم نأخذ فى دراسة الحالات الأكثر تعقيداً تدريجياً . اعتبر جسماً ساكناً بحيث لا توجد حركة على الإطلاق . لتغيير موضع جسم كهذا يلزم التأثير عليه بطريقة ما ، كدفعه أو رفعه ، أو جعل أجسام أخرى مثل الجياد أو المحركات البخارية تتحرك . ويدلنا الإلهام أن الحركة ترتبط بالدفع أو الرفع أو الشد . وكثرة التجربة تدفعنا إلى أن نخاطر ونقول أنه يجب أن يكون الدفع أشد لكي تكون حركة الجسم أسرع . ويكون من الطبيعى أن نستنتج أنه كلما كان التأثير على الجسم أقوى كلما كانت سرعته أكبر فالعربة ذات الجياد الأربعة تتحرك أسرع من العربة ذات الجوادين فقط . ونذكر بالبديهية ضرورة ارتباط السرعة بالتأثير .

من الحقائق التى يعرفها قراء القصص البوليسية الخيالية أن الدليل الكاذب يبعد القصة ويؤخر الوصول إلى الحل . وقد كانت طريقة التفكير التى أملاها الإلهام

خاطئة وأدت إلى أفكار غير صحيحة عن الحركة ، وقد ظلت هذه الأفكار سائدة قروناً كثيرة . وربما كانت مكانة أرسططاليس العظيمة في جميع أنحاء أوروبا هي السبب الرئيسى في استمرار الاعتقاد في هذه الفكرة البديهية زمناً طويلاً . نقتبس من كتاب « الميكانيكا » المنسوب إليه منذ ألفى عام :

« يسكن الجسم المتحرك إذا توقفت القوة التى تحركه عن التأثير » .

لقد كان اكتشاف جاليليو لطرق التفكير العلمى وتطبيقاته من أهم ما توصلنا إليه فى تاريخ التفكير الإنسانى ، ولم يبدأ علم الطبيعة حقيقة إلا منذ ذلك الوقت . فقد علمنا هذا الاكتشاف ألا نثق دائماً بالاستنتاجات البديهية المبنية على الملاحظات السريعة ، وذلك لأنها تقود فى بعض الأحيان إلى أدلة خاطئة .

ولكن أين يخطئ الإلهام ؟ هل يكون من الخطأ أن نقول أن العربى التى تجرها أربعة جياذ تتحرك أسرع من تلك التى يجرها جوادان فقط ؟ دعنا نختبر الخواص الأساسية للحركة بدقة ، ولنبدأ بالتجارب اليومية البسيطة التى اعتادها الإنسان منذ بدء الحضارة واكتسبها فى صراعه للبقاء .

نفرض أن شخصاً يدفع عربى فى طريق أفقى ، إذا توقف هذا الشخص عن الدفع فجأة فإن العربى تستمر فى الحركة مسافة قصيرة قبل أن تسكن ، وتسائل الآن : كيف يمكن زيادة هذه المسافة ؟ توجد طرق مختلفة مثل تشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية . فكما دارت العجلات بسهولة وكما كان الطريق أملس ، كلما استمرت العربى فى الحركة مدة أطول . ماهو التغير الذى حدث نتيجة لتشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية ؟ فقط الإقلال من تأثير العقبات الخارجية . فقد تناقص فعل ما يسمى بالاحتكاك فى كل من العجلات وبين العجلات والطريق . وهذا فى حد ذاته تفسير نظرى لحقيقة مشاهدة ، وهو فى الحقيقة تفسير اختيارى . يجب أن نخطو خطوة أخرى هامة إلى الأمام لنحصل على الدليل الصحيح . تخيل طريقاً لا خشونة فيه (أملس ١٠٠ ٪) وعجلات لا احتكاك فيها على الإطلاق . بذلك لا يوجد ما يوقف العربى وعلى ذلك تستمر .

في الحركة إلى الأبد . لا نصل إلى هذه النتيجة إلا بالتفكير في تجربة مثالية
يستحيل إجراؤها فعلاً ، وذلك لاستحالة التخلص من المؤثرات الخارجية . وهذه
التجربة المثالية تبين الدليل الذي هو في الواقع حجر الأساس في ميكانيكا الحركة .
بمقارنة طريقتي التفكير في المسألة يمكننا أن نقول : الفكرة الالهامية هي :
بازدياد التأثير تزداد السرعة . وعلى ذلك تبين السرعة ما إذا كانت هناك قوى
خارجية تؤثر على الجسم . الدليل الجديد الذي وجدته جاليليو هو : إذا لم يدفع
الجسم أو يجبر أو يؤثر عليه بأية طريقة أخرى ، أو بالاختصار إذا لم تؤثر قوى خارجية
على الجسم فإنه يتحرك بانتظام أي بسرعة ثابتة في خط مستقيم . أي أن السرعة
لا تبين ما إذا كان الجسم مؤثراً عليه بقوى خارجية أم لا ؟ وقد صاغ نيوتن نتيجة
جاليليو ، وهي النتيجة الصحيحة على هيئة قانون القصور الذاتي بعد ذلك بمدة
طويلة . وأول شيء في علم الطبيعة يحفظ عن ظهر قلب في المدارس هو هذا القانون ،
وبعضنا يتذكره في الصورة الآتية :

« يحتفظ كل جسم ساكن ، أو متحرك حركة منتظمة في خط مستقيم ،
بحالته إلا إذا اضطر إلى تغييرها نتيجة لتأثير قوى عليه » .

لقد رأينا أنه لا يمكن الوصول إلى قانون القصور الذاتي هذا مباشرة من
التجارب العملية ، وإنما نصل إليه عن طريق التفكير المتفق مع الملاحظة ، ورغم
استحالة إجراء التجربة المثالية فعلاً ، فإنها تؤدي إلى فهم شامل لتجارب حقيقية .
من بين الحركات المعقدة المختلفة الموجودة حولنا في الحياة ، سنختار الحركة
المنتظمة كمثل أول وهي أبسط الحالات لعدم وجود قوى خارجية مؤثرة . نلاحظ
أنه لا يمكن تحقيق الحركة المنتظمة عملياً ، فالحجر الساقط من برج ، أو العربة المدفوعة
في الطريق لا يمكن جعلها تتحرك حركة منتظمة تماماً ، وذلك لاستحالة التخلص
من القوى الخارجية .

في القصص البوليسية الجيدة ، تفقدنا الأدلة الواضحة في أكثر الأحيان إلى
الالتهام الخاطئ . بالمثل في محاولتنا فهم قوانين الكون نجد أن التفسيرات

البسيطة المبنية على الإلهام تكون في أغلب الأحيان خاطئة .
إن التفكير الإنساني ليخلق صورة دائمة التغير للكون ، والذي أضافه-
جاليليو هو تخلصه من وجهة النظر المبنية على الإلهام واستبدالها بأخرى جديدة .
وهذا هو مفزى اكتشاف جاليليو .

ويظهر على الفور سؤال آخر يتعلق بالحركة . مادامت السرعة ليست دليلاً
على القوى الخارجية المؤثرة على الجسم فما هو هذا الدليل ؟ لقد وجد جاليليو
جواب هذا السؤال كما وجده نيوتن في صورة أكثر اختصاراً ، وهذه الإجابة
دليل جديد في بحثنا .

للحصول على الجواب الصحيح ، يجب أن نؤمن التفكير في مسألة العربدة التي
تتحرك على طريق أملس . في هذه التجربة المثالية كان انتظام الحركة نتيجة لعدم
وجود أى قوى خارجية . نفرض أن العربدة التي تتحرك بانتظام دفعت في اتجاه
حركتها . ماذا يحدث الآن ؟ واضح أن سرعتها تزداد . كذلك من الواضح أنها
إذا دفعت في عكس اتجاه حركتها فإن سرعتها تتناقص . في الحالة الأولى تنير
السرعة وتزداد نتيجة للدفع ، وفي الحالة الثانية تتغير السرعة وتتناقص نتيجة له .
وتلى النتيجة الآتية على الفور : القوى الخارجية تغير السرعة . إذن لا تكون
السرعة نفسها نتيجة للدفع ، وإنما يكون تغيرها هو النتيجة ، وأية قوة إما أن
تزيد أو تنقص السرعة على حسب ما إذا كانت في اتجاه الحركة أم في عكسه .
لقد رأى جاليليو ذلك بوضوح وكتب في مؤلفه « علمان جديدان » :

« إذا اكتسب جسم سرعة معينة فإنه يبقى محتفظاً بها مادامت المؤثرات
الخارجية التي تعمل على تغييرها بالزيادة أو النقصان غير موجودة ، وهو شرط
لا يمكن توفره إلا على المستويات الأفقية وذلك لأنه يوجد فعلاً سبب لزيادة
السرعة في حالة المستويات التي تميل إلى أسفل ، كما يوجد سبب لتناقصها في حالة
المستويات التي تميل إلى أعلى ، وعلى ذلك ينتج أن الحركة على المستوى الأفقى تكون
مستمرة وذلك لأنه إذا كانت السرعة منتظمة فلا يمكن إنقاصها أو من باب
أولى ملاحظتها » .

إذا تتبعنا الدليل الصحيح فإننا نفهم مسألة الحركة بوضوح . وأساس الميكانيكا الكلاسيكية (القديمة) كما وضعها نيوتن هو العلاقة بين القوة والتغير في السرعة لا السرعة نفسها كما يبدو لنا بالبديهية .

لقد تكلمنا عن فكرتين تلعبان دورين هامين في الميكانيكا الكلاسيكية : القوة والتغير في السرعة . ولقد عمت كلا من هاتين الفكرتين أثناء تطور العلم . لذلك تلزم دراستهما بدقة .

ما هي القوة ؟ نعرف بالبديهية ماذا نعني بهذا اللفظ . لقد نشأت فكرة القوة عن الجهد المبذول في الدفع أو القذف أو الجر - من الإحساس العضلي الذي يصاحب كلا من هذه الأعمال . ولكن تعميم فكرة القوة يذهب إلى أبعد من هذه الأمثلة البسيطة بكثير . يمكننا التفكير في القوة دون أن نتخيل جواذاً يجر عربة ! ونحن نتكلم عن قوة الجذب بين الأرض والشمس وبين الأرض والقمر ، وعن القوة التي تسبب المد والجزر . ونتكلم عن القوة التي تجبرنا الأرض بواسطتها على أن نبقى في دائرة نفوذها (نحن وأى شيء آخر) وعن القوة التي بفضلها تولد الرياح الأمواج في البحر وتحرك ورق الأشجار . وعندما نلاحظ تغييراً في السرعة نعزو السبب على العموم إلى قوة خارجية . كتب نيوتن في مؤلفه « ^(١) » ينسبها يقول :

القوة الخارجية : هي فعل يؤثر على جسم ساكن أو متحرك بانتظام في خط مستقيم لتغيير حالته ، وتوجد هذه القوة أثناء تأثيرها فقط ولا تبقى في الجسم بعد انتهاء هذا التأثير ، وذلك لأن الجسم يحتفظ بكل حالة جديدة يصل إليها بواسطة قصوره الذاتي فقط . وتنشأ القوى الخارجية بطرق مختلفة ؛ فقد تنشأ عن الضغط أو التصادم أو عن القوى المركزية .

إذا ألقي حجر من قمة برج ؛ فإن حركته لا تكون منتظمة بحال من الأحوال وتزداد سرعة الحجر أثناء سقوطه . نستنتج إذن وجود قوة خارجية تعمل في اتجاه

(1) Principia.

الحركة ، ويمكن التعبير عن ذلك بطريقة أخرى بأن نقول أن الأرض تجذب الحجر . فلنأخذ مثلاً آخر : ماذا يحدث عند ما يُقذف حجر رأسياً إلى أعلى ؟ تتناقص السرعة حتى يصل الحجر إلى أقصى ارتفاع له ثم يبدأ في السقوط . القوة التي تسبب هذا التناقص في السرعة هي نفس القوة التي تسبب ازدياد سرعة الجسم الساقط . في إحدى الحالتين كانت القوة في اتجاه الحركة ، وفي الحالة الثانية كانت القوة في عكس هذا الاتجاه ، والقوة واحدة في الحالتين ولكنها تسبب ازدياد السرعة أو تناقصها على حسب ما إذا كان الحجر ساقطاً أو مقذوفاً إلى أعلى .

الكليات التجريبية :

جميع الحركات التي درسناها فيما سبق هي حركات خطية ، أى في خط مستقيم والآن يجب أن نخطو خطوة إلى الأمام ، ويمكن فهم قوانين الطبيعة إلى درجة محدودة إذا درسنا أبسط الحالات وتركنا في محاولاتنا الأولى جميع التعقيدات . فالخط المستقيم أبسط من المنحنى ، ولكن يستحيل الاكتفاء بفهم الحركة في مستقيم فقط . فحركة كل من القمر والأرض والنجوم هي حركات في مسارات منحنية ، وقد طبقت قوانين الميكانيكا بنجاح باهر على جميع هذه الحركات . والانتقال من الحركة الخطية المستقيمة إلى الحركة على منحنى يجلب صعوبات جديدة ويجب أن تكون لدينا الشجاعة الكافية لنخطى هذه الصعوبات إذا أردنا فهم قواعد الميكانيكا الكلاسيكية التي أعطتنا الإرشادات الأولى وبذلك كونت نقطة الابتداء في تطور العلم .

اعتبر الآن تجربة مثالية أخرى ، حيث تتدحرج كرة منتظمة بانتظام على نضد أملس . نعلم أننا إذا دفعنا الكرة ، أى إذا أثّرنا عليها بقوة خارجية ، فإن سرعتها تتغير . لنفرض الآن أن اتجاه الدفع ليس في اتجاه الحركة كما في حالة العربة وإنما في اتجاه آخر مخالف وليكن العمودى على هذا الاتجاه مثلاً . ماذا يحدث للكرة ؟ يمكن تمييز ثلاثة أطوار للحركة : الحركة الابتدائية ، تأثير القوة ، الحركة النهائية بعد توقف تأثير القوة . وحسب قانون القصور الذاتى ، تكون سرعة الكرة

قبل وبعد تأثير القوة منتظمتين تماماً . ولكن تختلف الحركة المنتظمة بعد تأثيرها ؛ فقد تغير اتجاه الحركة . اتجاه الحركة الابتدائية للكرة واتجاه القوة متعامدان . ولا تكون الحركة النهائية للكرة في أحد هذين الاتجاهين وإنما تقع بينهما ، ويكون اتجاهها أقرب إلى اتجاه القوة إذا كان الدفع شديداً وأقرب إلى اتجاه حركتها الأصلية إذا كان الدفع بسيطاً والسرعة الابتدائية كبيرة . نستخلص الآن النتيجة الجديدة الآتية المبينة على قانون القصور الذاتي : يتغير مقدار السرعة بصفة عامة ، وكذا اتجاهها نتيجة لتأثير القوة . وفهم هذه الحقيقة يمهد الطريق إلى التعميم الذي أدخل على علم الطبيعة بواسطة فكرة الكميات المتجهة .

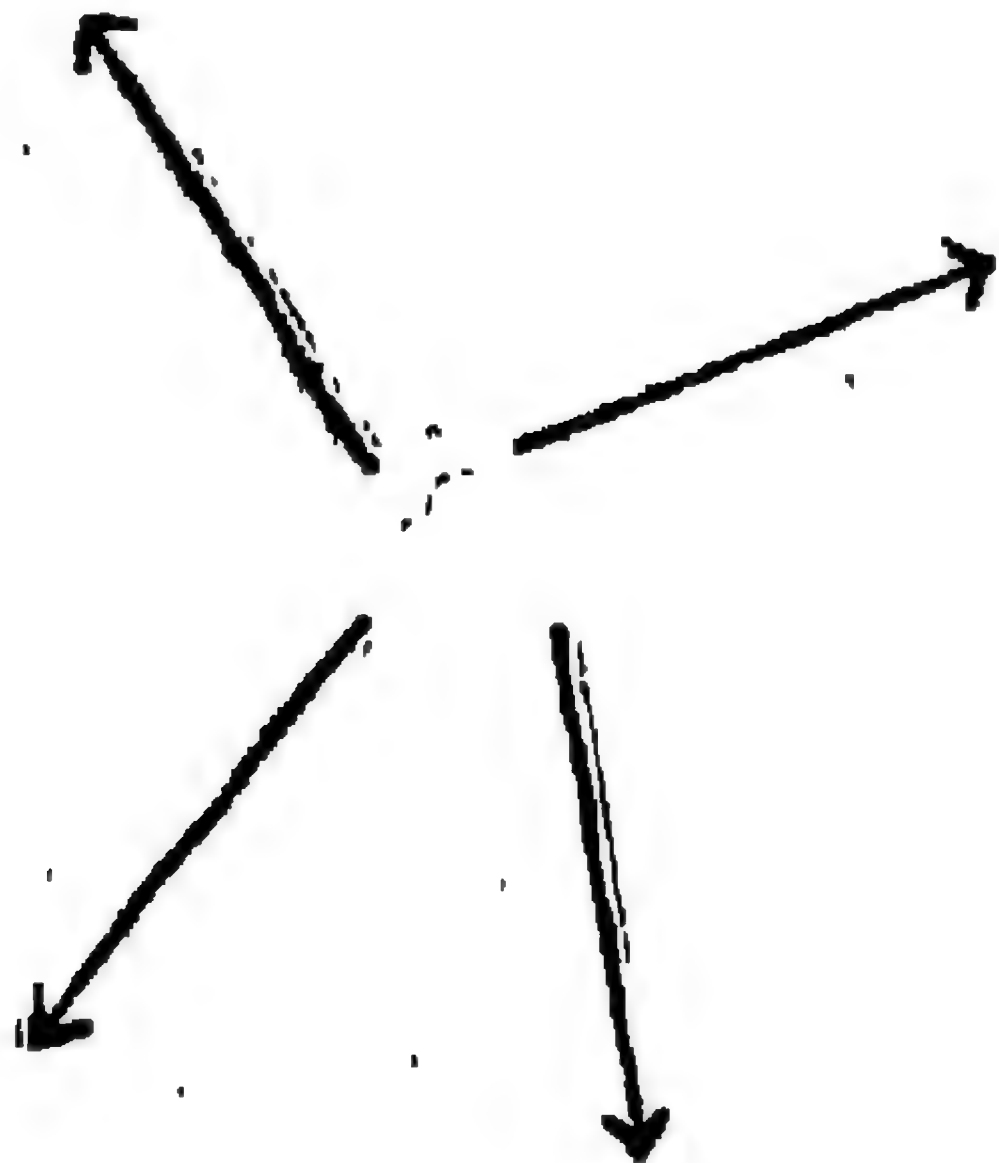
يمكننا أن نستمر في هذه الطريقة المنطقية الباشرة . وتكون نقطة الابتداء مرة أخرى هي قانون القصور الذاتي لجاليليو ، إذ لا يزال مجال استخدام نتائج هذا الدليل القيم في كشف لغز الحركة واسعاً .

لنعتبر كرتين تتحركان في اتجاهين مختلفين على نضد أملس . ولكي يكون لدينا صورة محددة للمسألة نفرض أن هذين الاتجاهين متعامدان نتيجة لعدم تأثير قوى خارجية ، تكون هاتان الحركتان منتظمتين تماماً . زيادة على ذلك نفرض أن القيمة العددية لسرعة كلا من الكرتين واحدة ، أي أنهما يقطعان نفس المسافة في نفس الفترة الزمنية الواحدة . ولكن هل يكون صحيحاً أن نقول أن الكرتين تتحركان بنفس السرعة ؟ يصح أن نجيب على هذا السؤال بنعم أو لا ! لقد جرت العادة أن نقول أن سيارتين تسيران بسرعة واحدة إذا كان عداد السرعة في كل منهما يبين أربعين ميلاً في الساعة مثلاً . مهما كان اتجاهي حركتهما . ولكن يجب على العلم أن يخلق لغته الخاصة وأفكاره الخاصة لاستعماله الخاص . غالباً ما تبدأ الأفكار العلمية بتلك المستعملة في اللغة العادية التي تستخدم في الحياة اليومية ولكنها تختلف عنها تماماً بعد تطويرها . فهي تتحول وتتخلص من الغموض الذي كان يلزمها في اللغة العادية وتصبح مضبوطة بدرجة تمكننا من تطبيقها علمياً . من وجهة نظر علم الطبيعة يكون من الأفضل أن نقول أن سرعتي الكرتين المتحركتين في اتجاهين مختلفين مختلفتان ، ومن الأنسب أن نقول أنه إذا تحركت

أربع سيارات متفرقة من ميدان واحد إلى أربعة شوارع مختلفة متفرعة من هذا الميدان فإن سرعاتها لا تكون متساوية حتى ولو سجلت عدادات السرعة في كل منهما أربعين ميلاً في الساعة مثلاً . وهذا التفريق بين السرعة وبين قيمتها العددية هو مثل يبين كيف يذير علم الطبيعة إحدى الأفكار المستعملة يومياً بطريقة تثبت فائدتها في تطورات العلم التالية .

إذا قسنا بُعداً من الأبعاد فإننا نعبر عن النتيجة بعدد معين من الوحدات . فطول عصا معينة قد يكون ثلاثة أقدام وتسع بوصات ، ووزن جسم معين قد يكون رطلان وثلاثة أوقيات ، كما تقاس الفترات الزمنية بالدقائق والثواني . في كل من هذه الحالات نعبر عن نتيجة القياس بعدد ، ولكن العدد وحده لا يكفي لوصف بعض الظواهر الطبيعية ، ويعد إدراك هذه الحقيقة تقدماً واضحاً في طريقة البحث العلمي . بالإضافة إلى العدد ، يلزم تحديد اتجاه لتعيين سرعة ما . وتسمى أية كمية من هذا القبيل أي ذات مقدار واتجاه : كمية متجهة . والزمن الذي يناسب الكمية المتجهة هو سهم . يمكن تمثيل السرعة بسهم ، أو باختصار ، بمتجه طوله يمثل القيمة العددية للسرعة في نظام وحدات معين واتجاهه هو اتجاه الحركة .

إذا تفرقت أربع سيارات من ميدان واحد بسرعة لها نفس القيمة العددية فإنه يمكن تمثيل سرعاتها بأربعة متجهات متساوية الطول كما هو واضح من الشكل . في المقياس



المستعمل تمثل البوصة ٤٠ ميلاً في الساعة بهذه الطريقة يمكن تمثيل أية سرعة بمتجه ، وبالعكس إذا علم المتجه ومقياس الرسم فمن الممكن الحصول على السرعة .

إذا تقابلت سيارتان تسيران في نفس الطريق في اتجاهين متضادين ، وكان عداد السرعة في كل منهما يبين ٤٠ ميلاً

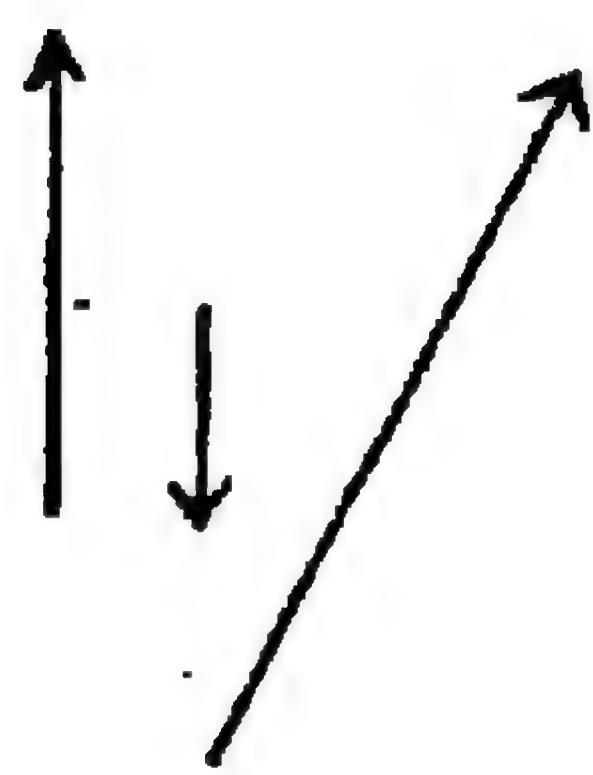
في الساعة ، فإن سرعتيهما تمثلان بمتجهين مختلفين يشير سهم الأول في عكس اتجاه سهم الثاني . بالمثل يجب أن يشير السهمان اللذان يبينان اتجاهي القطارات « من » و « إلى » المدينة في اتجاهين متضادين ، ولكن جميع القطارات الموجودة في أرصفة المحطات المختلفة والمتحركة نحو المدينة بسرعة



قيمتها العددية واحدة تكون لها نفس السرعة التي يمكن تمثيلها جميعاً بمتجه واحد ، ولا يوجد أى شيء في هذا

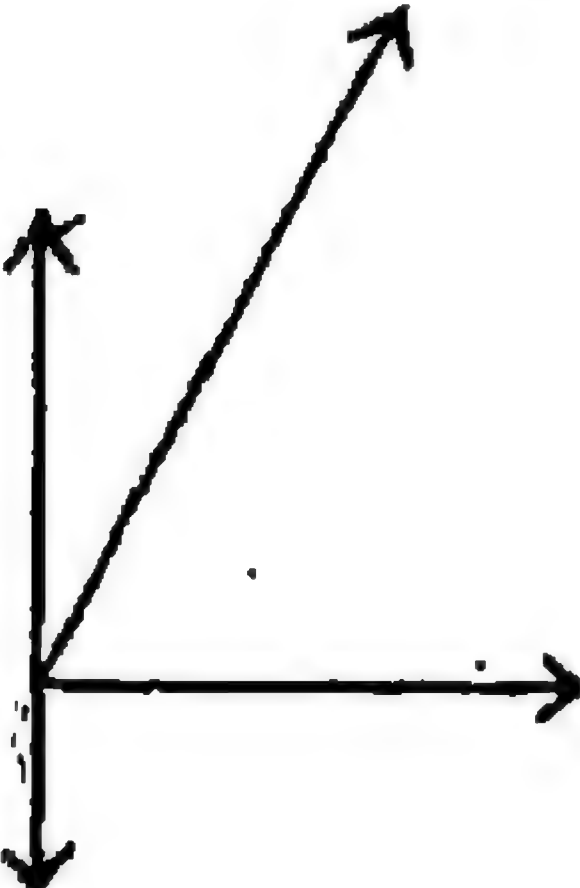
المتجه يبين المحطة التي يمر بها القطار أو الرصيف الخاص الذي كان عليه ، ومعنى ذلك أنه حسب المبدأ المتفق عليه ، يمكن اعتبار جميع هذه الاتجاهات وما يماثلها كما

هو مبين في الشكل متساوية ، وهي تقع في نفس الخط أو في خطوط متوازية وتكون متساوية الطول ، وأخيراً تشير أسهمها جميعاً إلى نفس الاتجاه .



يبين الشكل التالي اتجاهات غير متساوية وذلك لأنها تختلف إما في المقدار أو في الاتجاه أو في كليهما ، ويمكن رسم الأربعة اتجاهات هذه بطريقة أخرى بحيث

تتفرق جميعها من نقطة واحدة . وحيث أن نقطة الابتداء لا تهم ، يمكن أن تمثل هذه الاتجاهات سرعات أربع سيارات تتفرق من نقطة مرور واحدة ، أو سرعات أربع سيارات تتحرك في أربعة أماكن مختلفة من المدينة بسرعات قدها العددية واتجاهها كما هو مبين في الشكل .

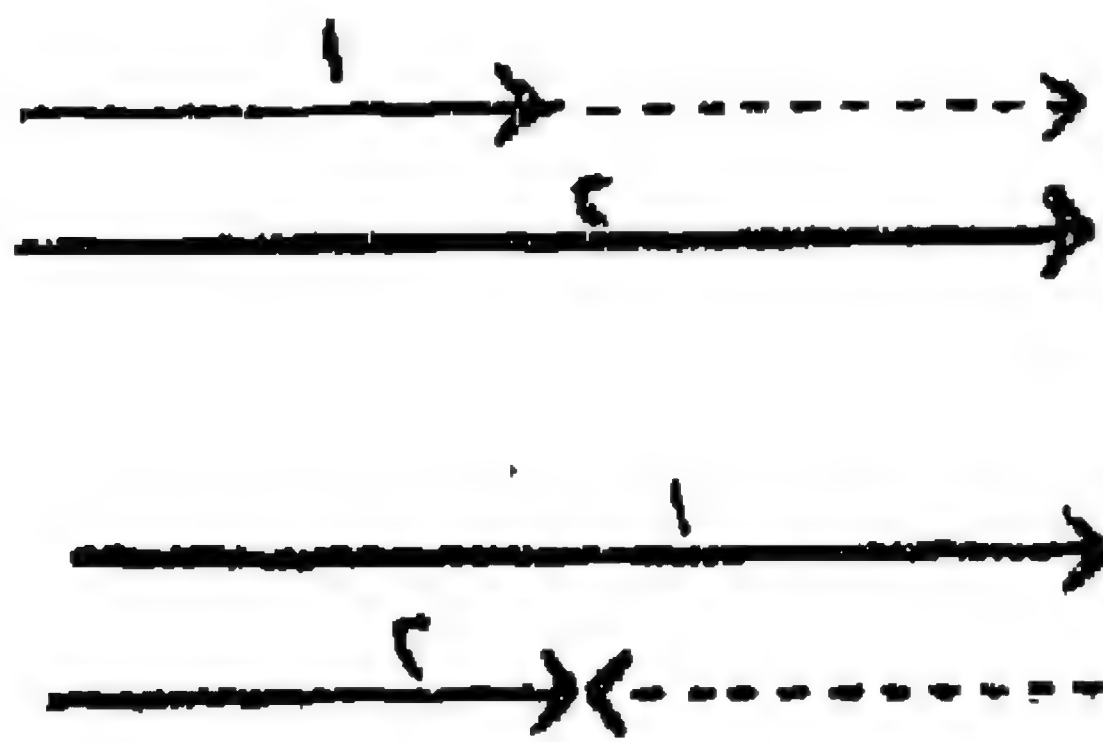


يمكننا الآن استعمال التمثيل بالاتجاهات في شرح الحقائق

الخاصة بالحركة الخطية التي بحثناها من قبل . لقد تكلمنا عن عربة تتحرك بانتظام

في خط مستقيم ، تدفع في اتجاه حركتها فتزداد سرعتها . يمكن تمثيل ذلك بيانياً بمتجهه ، الأول قصير ويمثل السرعة قبل الدفع ، والثاني أطول وله نفس الاتجاه ويمثل السرعة بعد الدفع ومعنى المتجه المتقطع واضح ؛ فهو يمثل التغير في السرعة الذي سببه الدفع . والحالة التي تكون فيها القوة في عكس اتجاه الحركة والتي تنقص فيها السرعة ، يختلف فيها الرسم بعض الشيء عما سبق . مرة أخرى يناظر

المتجه المنقطع التغير في السرعة ولكن
يختلف اتجاهه في هذه الحالة . ومن
الواضح أن التغير في السرعة هو كمية
متجهة مثل السرعة نفسها . ولكن
كل تغيير في السرعة ينتج عن تأثير
قوة خارجية ، وعلى ذلك يجب أن تمثل



هذه القوة بمتجه أيضاً . ولكي تعين القوة لا يكفي أن نحدد الشدة التي تدفع بها العربة ، وإنما يجب أن نحدد أيضاً اتجاه الدفع . والقوة مثلها في ذلك مثل السرعة ومثل التغير في السرعة يجب تمثيلها بمتجه وليس بعدد فقط . وعلى ذلك : القوة الخارجية هي أيضاً كمية متجهة ، ويجب أن يكون اتجاهها هو اتجاه التغير في السرعة . في الشكلين السابقين تبين المتجهات المثلة بخطوط متقطعة اتجاه القوة حيث أنها تمثل التغير في السرعة .

وربما يقول المتشائم هنا أنه لا يجد ميزة في استعمال المتجهات ، وإن كل ما حدث هو ترجمة حقائق معلومة لنا إلى لغة معقدة وغير عادية . ويصعب في هذه المرحلة إقناع مثل هذا الشخص بخطأ تفكيره ؛ وحتى الآن هو في الواقع محق في قوله ولكننا سنرى أن نفس هذه اللغة الغريبة ستقودنا إلى تعميم هام يستلزم وجود المتجهات .

لغز الحركة :

بإقتصارنا على دراسة الحركة الخطية فقط ، نبقى بعيدين عن فهم الحركات التي نراها يوميا في الحياة . لذلك يجب علينا بحث الحركة في مسارات منحنية ؛ وخطوتنا التالية هي تعيين القوانين التي تحدد مثل هذه الحركة . وليس هذا بالعمل السهل . لقد أثبتت أفكارنا عن السرعة وتغيرها والقوة فائدتها العظيمة في حالة الحركة الخطية . ولكننا لا نرى على الفور كيفية تطبيق هذه الأفكار على الحركة في مسار منحني ، ومن الممكن طبعا أن نتصور أن الأفكار القديمة لا تفيد في وصف الحركة العامة وأن من اللازم إيجاد أخرى جديدة . هل سنسير في طريقنا القديم أم سنبحث عن آخر جديد ؟

من العمليات التي تستخدم كثيراً في العلم عملية تعميم فكرة معينة ، وطريقة التعميم نفسها ليست محددة ، لأنه توجد في الغالب طرق مختلفة للقيام به ولكن يجب أن يتحقق شرط معين : يجب أن تؤول أية فكرة يعد تعميمها إلى الفكرة الأصلية إذا توفرت الشروط الأصلية .

وأنسب طريقة لتوضيح ذلك هو بحث المثال الموجود بين يدينا . يمكننا محاولة تعميم أفكارنا القديمة عن السرعة ، التغير في السرعة ، القوة في حالة الحركة في مسار منحني . وعبارة المسارات المنحنية تشمل الخطوط المستقيمة فالخط المستقيم حالة خاصة وتافهة من المنحني . وعلى ذلك إذا أدخلت فكرة السرعة ، والتغير في السرعة والقوة لحالة الحركة في خط منحني فإنها تكون قد أدخلت أوتوماتيكيا للحركة في خط مستقيم ويجب ألا تتعارض هذه النتيجة مع النتائج التي حصلنا عليها سابقا . إذا أصبح المنحني خطا مستقيما وجب أن تؤول الأفكار العامة الجديدة إلى الأفكار المألوفة التي استطعنا بواسطتها وصف الحركة الخطية . ولكن هذا الشرط لا يكفي لتعيين التعميم الوحيد المطلوب ، إذ قد يستوفي هذا الشرط بأكثر من طريقة واحدة . ويبين لنا تاريخ العلم أن أبسط تعميم ممكن ينجح

في بعض الاحيان ويفشل في احيان أخرى . وتضمن طريقة التعميم الصحيحة في حالتنا الخاصة هذه بسيط للناية . وسنجد أن الأفكار الجديدة مفيدة للغاية وانها كما تساعد على فهم حركة حجر مقذوف في الهواء تساعد أيضا على فهم حركة الكواكب .

والآن على أي شيء تدل كلمات السرعة ، التغير في السرعة ، القوة ، في الحالة العامة ، أي في حالة الحركة في خط منحن ؟ فلنبدا بالسرعة . يتحرك جسم صغير

جداً على المنحنى من اليسار

إلى اليمين . يسمى مثل هذا

الجسم الصغير في أغلب



الاحيان نقطة مادية . وتبين الدائرة الصغيرة على المنحنى في الشكل السابق موضع النقطة المادية عند لحظة معينة من الزمن . ماهي السرعة التي تناظر هذا الموضع وهذه اللحظة الزمنية ؟ مرة أخرى يبين دليل جاليليو طريقة لتعريف السرعة ويجب أن نلجأ إلى الخيال مرة أخرى ونفكر في تجربة مثالية . تتحرك النقطة المادية على المنحنى من اليسار إلى اليمين تحت تأثير قوى خارجية فلنتخيل الآن أنه عند لحظة معينة وعند النقطة التي تدل عليها الدائرة الصغيرة ، توقفت جميع هذه القوى عن التأثير . حسب قانون القصور الذاتي يجب أن تصبح الحركة منتظمة نتيجة لذلك . في الحياة العملية يستحيل علينا بالطبع أن نمنع جميع القوى الخارجية من التأثير على جسم ما ويمكننا فقط أن نقول « ماذا يحدث إذا ... ؟ » ونحكم على صحة هذا التفكير بالنتائج التي نحصل عليها منه وباتفاق هذه النتائج مع التجربة .

يبين المتجه في الشكل التالي اتجاه الحركة المنتظمة كما تتصوره على فرض تلاشي جميع القوى الخارجية وهو اتجاه البستقيم المسمى بالماس . وإذا نظرنا باليكروسكوب إلى النقطة المادية المتحركة فإننا لآرى إلا جزءاً صغيراً جداً من

المنحنى ويظهر هذا الجزء كقطعة مستقيمة صغيرة ، والمماس هو امتداد هذه القطعة



والمتجه المبين يمثل السرعة عند لحظة معلومة ويقع متجه السرعة على المماس. ويمثل طول هذا المتجه القيمة العددية للسرعة كما يبينها عداد السرعة في سيارة مثلاً .
يجب ألا نهتم كثيراً بالتجربة المثالية التي نفترض فيها تلاشي القوة لكي نحصل على اتجاه السرعة فهي تساعدنا فقط على فهم ما يجب أن نسميه متجه السرعة وتمكننا من تعيينه عند موضع معين ولحظة معينة .

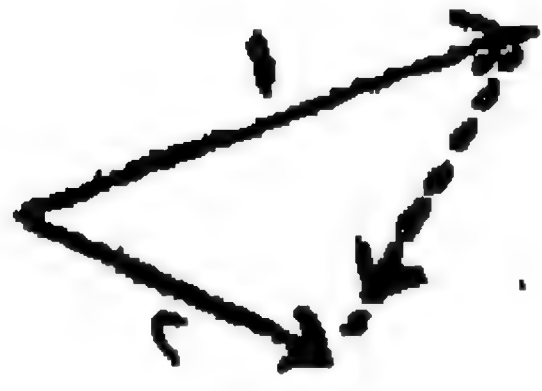
الشكل التالي يبين متجهات سرعة نقطة مادية تتحرك على منحنى عند ثلاثة مواضع مختلفة : في هذه الحالة يتغير كل من اتجاه السرعة ومقدارها (الذي يمثل بطول المتجه) أثناء الحركة .



هل تحقق هذه الفكرة الجديدة عن السرعة جميع ما تتطلبه في التعميمات المختلفة أى هل تؤول هذه الفكرة إلى الفكرة المألوفة للسرعة عند ما يصبح المنحنى خطاً مستقيماً ؟ من الواضح أنها تحقق ذلك . فالمماس لخط مستقيم هو المستقيم نفسه ويقع متجه السرعة على خط الحركة نفسه كما في حالة العربة المتحركة أو الكرات المتدحرجة .

وخطوتنا التالية هي إيجاد معنى التغير في سرعة نقطة مادية تتحرك في منحنى .
يمكن الحصول على ذلك بطرق مختلفة وسنختار أبسطها وأنسبها . يبين الشكل السابق عدة متجهات للسرعة تمثل الحركة عند نقط مختلفة من المسار ويمكن كما

رأينا من قبل رسم المتجهين الأول والثاني مرة أخرى بحيث يشتركان في نقطة
الابتداء .



يسمى المتجه الممثل
بالخط المنقطع « التغير في
السرعة » ونقطة الابتداء
له هي نهاية المتجه الأول
ونهايته هي نهاية المتجه

الثاني . ولأول وهلة قد يظهر تعريف التغير في السرعة هذا كأنه عديم المعنى
ومتكلف . ويزداد وضوح هذا التعريف عندما يكون اتجاه المتجهين (١) ، (٢)
واحداً . ومعنى ذلك طبعا هو العودة إلى حالة الحركة في خط مستقيم . إذا كانت
نقطة ابتداء المتجهين واحدة فإن المتجه المنقطع يصل بين نهايتهما أيضا . ويصبح
الرسم في هذه الحالة مطابقا للموجود في (ص ١٢) ونحصل على الفكرة القديمة



لكالة خاصة من الفكرة الجديدة . وقد يكون
من المفيد أن نشير هنا إلى أننا اضطررنا
لفصل بين الخطين في الرسم السابق

لكي لا ينطبقا ويصبح من المستحيل التفريق بينهما .

يبقى علينا الآن أن نخطو الخطوة الأخيرة في عملية التعميم هذه وهي أهم
التحسينات التي فكرنا فيها إلى الآن يجب إيجاد العلاقة بين القوة والتغير في السرعة
وذلك لكي نصوغ الدليل الذي يمكننا من فهم موضوع الحركة العام .

لقد كان الدليل الذي أدى إلى شرح الحركة في خط مستقيم بسيطا . القوى
الخارجية هي سبب التغير في السرعة ، وإذاً يكون لمتجه القوة نفس اتجاه هذا
التغير . والآن ما الذي سنأخذه كدليل لشرح الحركة في منحني ؟ نفس الشيء
تماما ! والفرق الوحيد هو أن لتغير السرعة الآن معنى أوسع من معناه السابق
ونظرة واحدة إلى المتجهات الممثلة بخطوط متقطعة في الشكلين السابقين توضح

هذه النقطة تماماً . إذا أعطيت السرعة عند جميع نقط المنحنى فإنه يمكننا على الفور استنتاج اتجاه القوة عند أى نقطة . ويجب رسم متجهى السرعة عند لحظتين متقاربتين جداً وبذلك نناظران موضعين قريبين جداً من بعضهما . والمتجه الواصل بين نهاية المتجه الأول إلى نهاية المتجه الثانى يبين اتجاه القوة المؤثرة ولكن من المهم جداً أن تكون الفترة الزمنية بين اللحظتين اللتين تمثل السرعة عندهما بهذين المتجهين « صغيرة جداً » والتحليل الدقيق للعبارات التى تعادل « قريبة جداً » ، « صغيرة جداً » ليس سهلاً على الإطلاق . والواقع أن هذا التحليل هو الذى قاد نيوتن وليبنز إلى اكتشاف حساب التفاضل .

إن الطريق الذى يقودنا إلى تعميم دليل جاليليو متعب للغاية . ولا يمكننا أن نبين هنا كثرة نتائج هذا التعميم وفوائد هذه النتائج . وتطبيق هذا التعميم يقودنا إلى كثير من التفسيرات البسيطة المفعنة لكثير من الحقائق التى كانت مفككة وغير مفهومة قبل ذلك .

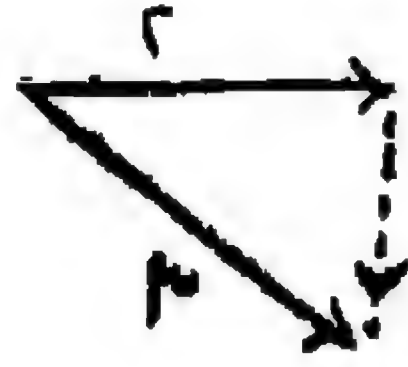
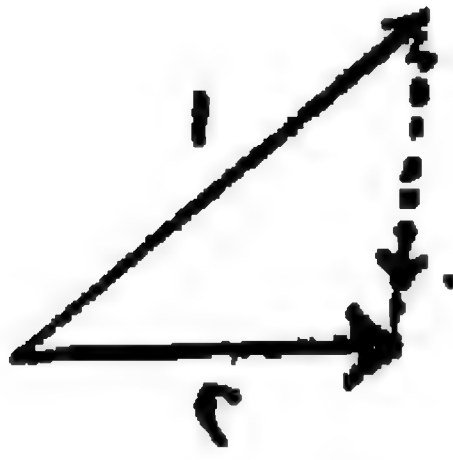
من بين الحركات الكثيرة التى لا حصر لها سنختار أبسطها فقط ونطبق القانون الذى وجدناه الآن فى شرحها .

إذا أطلقت رصاصة من بندقية ، أو قذف حجر فى اتجاه مائل ، أو اندفع ماء من خرطوم ، فإنها جميعاً ترسم مسارات متشابهة ومألوفة لنا . هذه المسارات هى قطاعات مكافئة . تصور عدداً للسرعة مثبتاً فى حجر مثلاً ، وذلك لىكى تتمكن من رسم متجه سرعته عند أى لحظة . والرسم التالى يبين النتيجة .



اتجاه القوة المؤثرة على الحجر هو نفس اتجاه التغير فى سرعته ، وقد رأينا كيف نعين هذا الأخير ، والنتيجة المبينة فى الرسم التالى توضح أن القوة رأسية

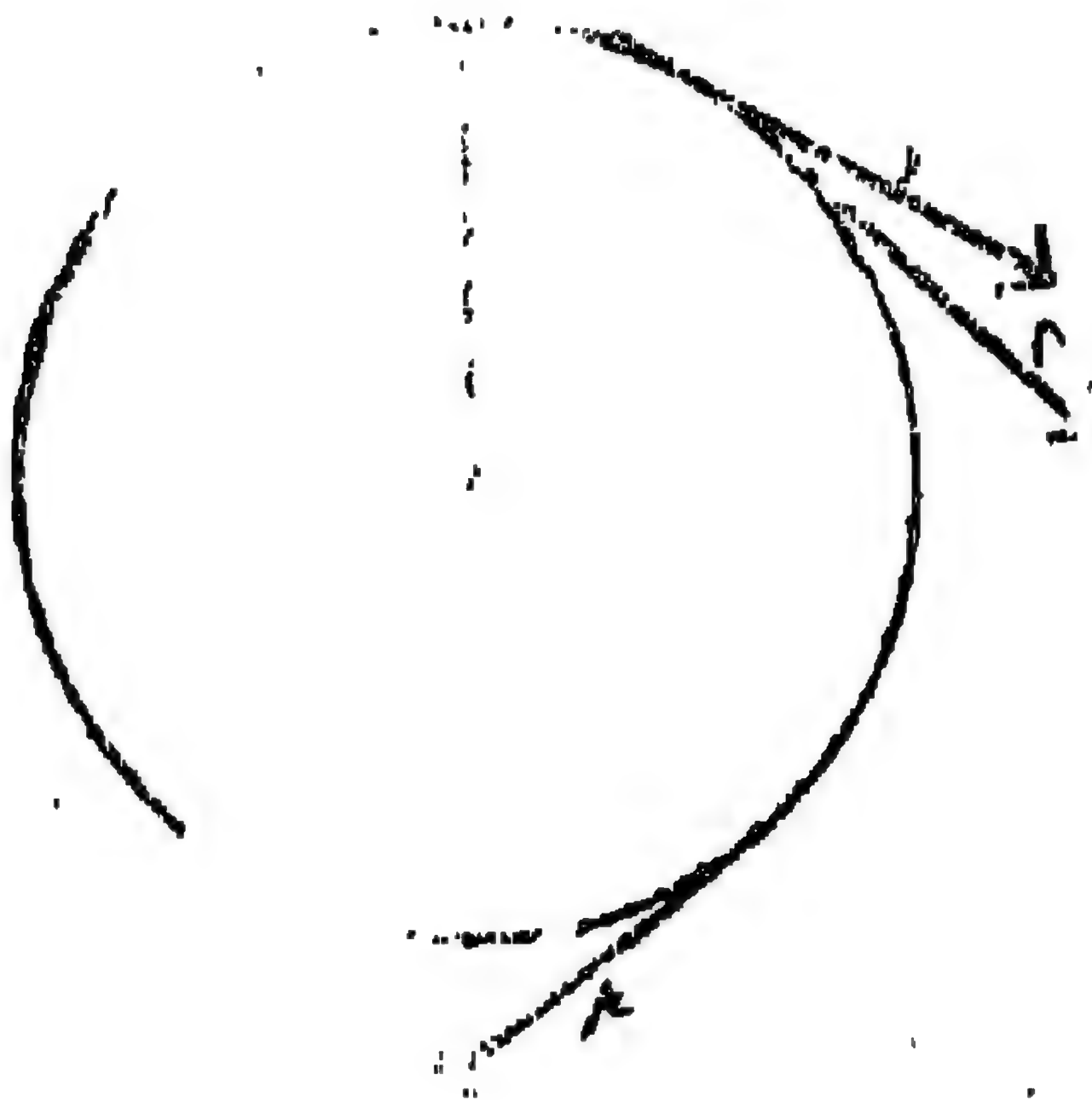
إلى أسفل . ويحدث نفس الشيء في حالة سقوط حجر من قمة برج .
المساران مختلفان وكذلك السرعتان ولكن التغير في السرعة له نفس الاتجاه ،
وهو نحو مركز الأرض .



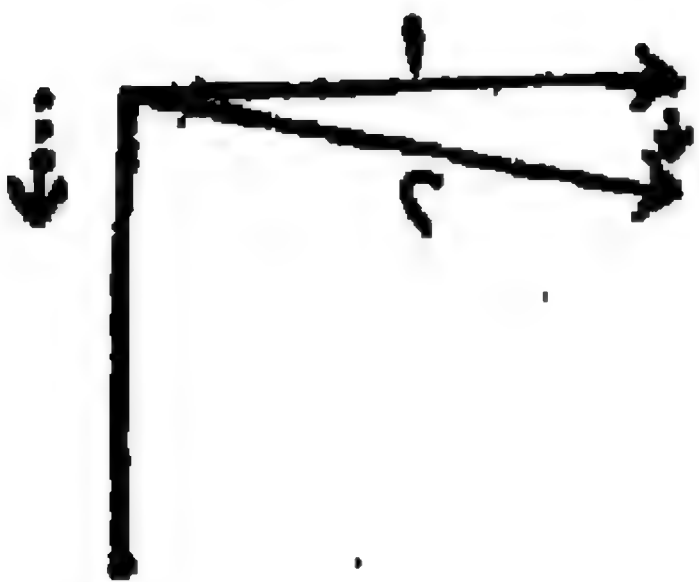
إذا ربطنا حجر في نهاية
خيط وجعلناه يدور في مستو
أفق فإنه يتحرك في مسار دائري .

أطوال جميع المتجهات الموجودة في الشكل الذي يمثل هذه الحركة تكون
متساوية إذا كانت القيمة العددية للسرعة ثابتة وبالرغم من ذلك فإن السرعة

ليست منتظمة . لأن المسار
ليس خطاً مستقيماً ، والحركة
المنتظمة في خط مستقيم هي
الحركة الوحيدة الممكن حدوثها
دون تأثير قوى ، وفي حالتنا
هذه توجد قوى مؤثرة والذي
يتغير هو اتجاه السرعة لا قيمتها
وحسب قانون الحركة يتحتم
وجود قوة ما تسبب هذا التغير ،
وهي في هذه الحالة قوة بين الحجر



وبين اليد المسكة بالخيط . ويطرأ السؤال الآتي على
الذهن فوراً : ما هو اتجاه تأثير هذه القوة ؟ مرة
أخرى يعطينا رسم المتجهات الجواب : نرسم متجهي
السرعة عند نقطتين قريبتين جداً ومن ذلك نحصل
على التغير في السرعة . نلاحظ أن هذا المتجه



الأخير له نفس اتجاه الخيط ويكون دائماً عمودياً على اتجاه السرعة أي على المماس .
أي أن اليد تؤثر على الحجر بقوة بواسطة الخيط .

ودوران القمر حول الأرض مثال مشابه للسابق وذو أهمية كبرى . ويمكن

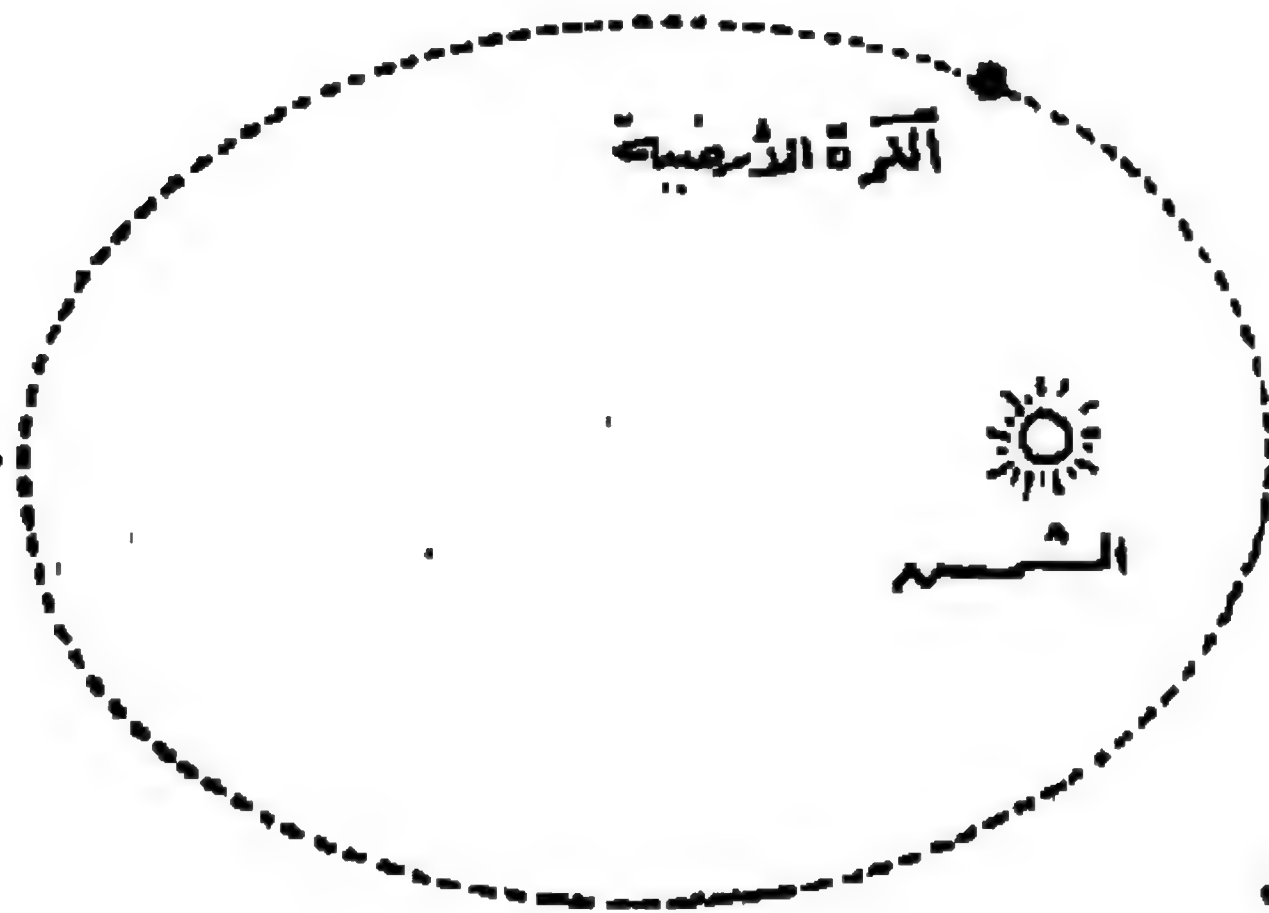
تمثيل هذا الدوران تقريبا بحركة دائرية منتظمة . وتتجه القوة نحو الأرض لنفس السبب الذى كانت القوة من أجله موجهة نحو اليد فى المثال السابق . لا يوجد خيط يصل بين القمر والأرض ولكن يمكننا أن نتخيل خطا واصلا بين مركزى هذين الجسمين . تقع القوة على هذا الخط وتكون نحو مركز الأرض ، مثلها فى ذلك مثل القوة المؤثرة على الحجر المقذوف فى الهواء أو الساقط من برج .

ويمكن تلخيص جميع ما قلناه عن الحركة فى جملة واحدة . القوة والتغير فى السرعة متجهان لهما نفس الاتجاه . هذا هو الدليل الأول لمعضلة الحركة ، ولكن من المؤكد أنه لا يكفى لتفسير جميع الحركات التى نراها تفسيراً تاماً . لقد كان التحول من طريقة تفكير أرسطو إلى طريقة تفكير جاليليو من أهم الأسس التى بنى عليها العلم . فبعد هذا التحول أصبح طريق التطورات التالية واضحاً ، والذى يهمننا هنا هو مراحل التطور الأولى ، وتتبع الأدلة الأولى وتوضح كيف تنشأ الأفكار العلمية نتيجة للصراع العنيف مع الأفكار القديمة . نحن نهتم هنا بالأعمال العظيمة فى العلم فقط مثل إيجاد طرق جديدة وغير متوقعة للبحث ومثل مخاطر التفكير العلمى التى تخلق صورة دائمة التغير للكون . وتكون الخطوات الأولى الأساسية ذات طابع ثورى دائماً . فالتخيل العلمى يرى أن الأفكار القديمة ضيقة ومحدودة فيغيرها بأخرى جديدة ، والإنتاج المستمر حول فكرة موجودة فعلاً يكون دائماً أقرب إلى التطور إلى أن تصل إلى مرحلة معينة فيصبح من الضروري فتح مجال جديد ، ومع ذلك فلكى نفهم الأسباب والصعوبات التى تسبب تغيراً فى مبادئ هامة يجب علينا أن نعلم الأدلة الأولى وأيضاً النتائج التى يمكن استخلاصها منها .

من أهم سميزات علم الطبيعة الحديث أن النتائج المستخلصة من الأدلة الأولى ليست نوعية فقط بل كمية أيضاً . فلنعتبر مرة أخرى حالة الحجر الساقط من برج لقد رأينا أن سرعته تزداد بازدياد المسافة التى يسقطها ولكننا نريد أن نعلم أكثر من ذلك ، ما هو مقدار التغير فى السرعة ؟ وما هى سرعة وموضع الحجر عند لحظة معينة بعد بدء الحركة ؟ نريد أن يكون فى استطاعتنا التنبؤ بما سيحدث

وأن نعين بالتجربة مدى صحة هذا التنبؤ وبالتالي مدى صحة الفروض الأولى .
واللحصول على نتائج كمية يجب استعمال لغة الرياضة . معظم أفكار العلم
الأساسية بسيطة في لبها ويمكن في أغلب الأحيان التعبير عنها بلغة يفهمها
الشخص العادي . وتتبع هذه الأفكار يستلزم الإلمام بطرق بحث متقدمة للغاية ،
ولكي نستخلص نتائج يمكن مقارنتها بما نحصل عليه من التجارب يجب استخدام
علم الرياضة كوسيلة منطقية . يمكننا أن نتجنب استعمال لغة الرياضة ما دمنا لا نهتم
إلا بالأفكار الطبيعية الأساسية . وحيث أننا نفعل ذلك باستمرار في هذا الكتاب ،
سنضطر في بعض الأحيان أن نكتفي بذكر النتائج الضرورية لفهم الأدلة الهامة
التي تنشأ عن التطورات التالية دون ذكر البرهان . والتمن الذي ندفعه لتجنب لغة
الرياضة هو نقص في الدقة واضطرارنا في بعض الأحيان إلى ذكر نتائج دون أن نبين
كيفية الوصول إليها .

وأحد الأمثلة الهامة هو حركة الأرض حول الشمس . من المعلوم أن المسار
هو منحنى مقفل يسمى قطع ناقص . برسم شكل يبين متجهات التغير في السرعة ،
نرى أن اتجاه القوة المؤثرة على الأرض هو نحو الشمس . ولكن هذه المعلومات
ليست كاملة مطلقاً فنحن نود أن يكون في استطاعتنا أن نعلم موضع الأرض والكواكب
الأخرى عند أى وقت ، ونود



أيضاً أن يكون في استطاعتنا
التنبؤ بوقت حدوث وفترة استمرار
الكسوف الشمسي التالي وبكثير
من الظواهر الفلكية الأخرى .
إن هذا ممكن ولكن ليس
على أساس الدليل الأول فقط .

لأنه يتحتم للحصول على المعلومات السابقة معرفة اتجاه القوة وأيضاً قيمتها المطلقة
أى مقدارها . ونيوتن هو الذى أتجه الاتجاه الصحيح عند هذه النقطة . وقد كان
عمله عظيماً حقاً . فحسب قانون الجاذبية المنسوب له ترتبط قوة الجذب بين جسمين

ارتباطاً بسيطاً بالبعد بينهما . وتصغر القوة عندما يزداد هذا البعد . ولكي نكون أكثر دقة نقول أن القوة تصغر إلى $\frac{1}{r^2} \propto \frac{1}{r^2} = \frac{1}{r^2}$ قيمتها عندما يتضاعف البعد، وإلى $\frac{1}{r^2} \propto \frac{1}{r^2} = \frac{1}{r^2}$ قيمتها عندما يزداد البعد إلى ثلاثة أمثاله .

على ذلك نرى أنه يمكن في حالة قوة الجذب التعبير ببساطة عن الارتباط بين القوة وبين البعد بين الجسمين المتحركين .

تتبع نفس الطريقة في جميع الحالات الأخرى التي تؤثر فيها قوى أخرى مختلفة مثل القوى المغناطيسية والكهربائية وما شابهها ، ونحاول أن نعبر بصيغة بسيطة عن القوة ولا نكون محقين في التعبير عن القوة بهذه الصيغة إلا إذا حققنا النتائج المستخلصة منها بالتجربة .

ولكن معرفة قوة الجذب وحدها لا تكفي لتعيين حركة الكواكب: لقد رأينا أن المتجهين اللذين يمثلان القوة وتغير السرعة في فترة زمنية قصيرة يكونان في نفس الاتجاه . يجب الآن أن تتبع نيوتن ونخطو خطوة أخرى فنفترض علاقة بسيطة بين طول هذين المتجهين . تحت نفس الشروط السابقة ، أي إذا اعتبرنا حركة نفس الجسم في فترات صغيرة من الزمن فرأى نيوتن أن التغير في السرعة سيتناسب مع القوة . أي أنه يلزم تخمين فكرتين مكملتين لبعضهما للحصول على نتائج كمية لحركة الكواكب . الفكرة الأولى عامة وهي تعطى العلاقة بين القوة والتغير في السرعة . والثانية خاصة وهي تحدد بالضبط العلاقة بين القوة المؤثرة المعينة وبين البعد بين الجسمين . والفكرة الأولى هي قانون الحركة لنيوتن والثانية هي قانون الجاذبية له أيضا . والفكرتان معاً تعينان الحركة تماما . ويتضح ذلك من المنطق التالي الذي قد يبدو غامضاً بعض الشيء . نفرض أننا عند لحظة معينة نعلم موضع وسرعة كوكب وأيضاً القوة المؤثرة عليه . باستعمال قوانين نيوتن نستطيع أن نعين التغير في السرعة في فترة زمنية قصيرة . وحيث أننا نعلم الآن السرعة الابتدائية وتغيرها ، يكون في استطاعتنا تعيين موضع وسرعة الكوكب في نهاية الفترة الزمنية . بالتكرار المستمر لهذه العملية ، يمكن الحصول على المسار الكامل للكوكب دون الحاجة إلى أية أحصائيات أخرى من التي نحصل عليها بالملاحظة

وهذه هي الطريقة النظرية التي تستطيع الميكانيكا بواسطتها أن تتنبأ بسير جسم متحرك ، ولكن يصعب تطبيق هذه الطريقة عمليا . ففي الواقع تكون هذه الطريقة متعبة للغاية وغير دقيقة . ومن حسن الحظ اننا غير مضطرين لاستعمال هذه الطريقة ، فعلم الرياضة يهيء طريقا أقصر يمكننا من وصف الحركة وصفا دقيقا والمجهود المستعمل الذي يبذل في ذلك يكون أقل بكثير من المجهود الذي يبذل في كتابة جملة واحدة . ويمكن التأكد من صحة أو خطأ النتائج التي يحصل عليها من هذا الطريق بالملاحظة .

القوة التي تلاحظها في حركة الحجر الساقط في الهواء والقوة التي تلاحظها في دوران القمر في مساره هما قوتان من نوع واحد ألا وهو جذب الأرض للأجسام المادية . ولقد أدرك نيوتن أن حركة الأحجار الساقطة وحركة القمر والكواكب ليست إلا ظواهر خاصة لقوة جذب عامة تؤثر بين أي جسمين . في الحالات البسيطة يمكن باستعمال علم الرياضة وصف الحركة والتنبؤ بها . أما في الحالات المعقدة التي تشمل تأثير أجسام كثيرة على بعضها فلا يكون من السهل وصف الحركة رياضيا ولكن تبقى القواعد الأساسية بدون تغير .

نرى الآن أن النتائج التي توصلنا إليها بتتبع الأدلة الأولى صحيحة في حالة حركة الحجر المقذوف وفي حالة حركة القمر والأرض والكواكب . والذي يجب اختبار صحته بالتجربة العملية هو طريقتنا في التفكير جميعها . ولا يمكن اختبار صحة أي من الفروض على حدة . ولقد نجحت قوانين الميكانيكا هذه نجاحا باهرا في تفسير حركة الكواكب حول الشمس ، ومع ذلك فقد توجد قوانين أخرى مبنية على فروض مختلفة وتنجح أيضا في تفسير ذلك . أن نظريات علم الطبيعة هي ابتكارات حرة . للعقل البشري وليست كما قد يظهر ، وحيدة ومحدودة تماما بالعالم الخارجي ، ونحن في محاولتنا فهم الحقيقة نشبه رجلا يحاول فهم تركيب ساعة مغلقة . وهو يرى وجهها وعقاربها المتحركة ويسمع أيضا دقاتها ولكنه لا يستطيع فتح صندوقها . وإذا كان الرجل عبقريا فإنه قد يستطيع أن يكون صورة ما لتركيب قد يسبب جميع ما يشاهده ، ولكنه لن يكون

بمحال من الأحوال متأكداً من أن هذا هو التركيب الوحيد الذى يسبب مشاهداته ويستحيل عليه أيضا أن يقارن الصورة التى كونها لنفسه بالتركيب الحقيقى ، بل أنه ليتعذر عليه أن يتخيل امكان أو معنى هذه المقارنة . ولكن من المؤكد أنه يعتقد أنه كلما زاد من معوماته كلما أصبحت الصورة التى يكونها عن الواقع بسيطة وكلما فسرت هذه الصورة عددا أكبر من مشاهداته . كما أنه قد يعتقد فى وجود النهاية المثالية للمعرفة وفى اقتراب العقل البشرى منها . وربما اطلق على هذه النهاية المثالية لفظ الحقيقة الموضوعية .

يبقى دليل آخر :

يهيأ للانسان عند البدء فى دراسة الميكانيكا ، أن كل شيء فى هذا الفرع من العلوم بسيط وأن مجال البحث فيه قد انتهى ، ويندر أن يفكر الانسان فى وجود دليل هام لم يلاحظه أحد لمدة ثلاثة قرون . ويرتبط هذا الدليل الذى عانى الاهمال باحدى الأسس الهامة فى الميكانيكا — الكتلة .

سنعود مرة أخرى إلى تجربتنا المثالية البسيطة . حركة عربة على طريق أملس تماما . إذا كانت العربة ساكنة عند بدء الحركة ثم دفعت فإنها تتحرك بعد ذلك بسرعة منتظمة معينة . نفرض الآن أن من الممكن إعادة هذه العملية بحذاقها أى عدد مطلوب من المرات بحيث تؤثر نفس القوة فى نفس الاتجاه على نفس العربة مهما كان عدد مرات تكرار هذه التجربة فإننا نحصل دائماً على نفس السرعة النهائية : ماذا يحدث لو أننا غيرنا التجربة أى ماذا يحدث مثلاً لو أن العربة كانت فارغة فى التجربة الأولى ومحملة فى الثانية ؟ تكون السرعة النهائية للعربة المحملة أقل من السرعة النهائية للعربة الفارغة . من ذلك نستنتج أنه إذا أثرت قوة واحدة على جسمين مختلفى الكتلة فحركتهما من حالة السكون فإن سرعتيهما الناتجتين لا تكونا متساويتين أى أن السرعة تتوقف على كتلة الجسم وتكون السرعة أقل إذا كانت الكتلة أكبر .

على ذلك نستطيع ، ولو نظرياً ، أن نعين كتلة جسم ما ، أو بعبارة أدق

نستطيع أن نعين النسبة بين كتلة جسم ما وكتلة جسم آخر فإذا كان لدينا قوتان متساويتان تؤثران على كتلتين ساكنتين ، ووجدنا أن سرعة الكتلة الأولى بعد التأثير تساوى ثلاثة أضعاف سرعة الكتلة الثانية فإننا نستنتج أن الكتلة الأولى تساوى ثلث الكتلة الثانية . وطبعاً ليست هذه بطريقة عملية لتعيين النسبة بين كتلتين . ومع ذلك فيمكننا أن نتخيل أننا قد تمكنا من تعيين هذه النسبة إما بهذه الوسيلة أو بأية وسيلة أخرى مبنية على قانون القصور الذاتى .

كيف تقدر الكتل فى الحياة العملية ؟ طبعا ليس بالطريقة التى ذكرناها فيما سبق . كل شخص يعرف الإجابة الصحيحة لهذا السؤال ، فنحن نقدر الكتل بوزنها على ميزان .

دعنا نبحث بالتفصيل الطريقتين المختلفتين لتعيين الكتلة .
لا توجد أية علاقة بين التجربة الأولى وبين الجاذبية الأرضية فالعربة تتحرك بعد الدفع على مستوى أفقى أملس . وقوة الجاذبية التى تسبب بقاء العربة على المستوى تبقى ثابتة ولا تدخل مطلقاً فى تعيين الكتلة . أما حالة الوزن فتختلف عن ذلك . يستحيل علينا استعمال الميزان إذا لم تجذب الأرض الأجسام ، أى إذا لم توجد قوة الجاذبية . الفرق بين طريقتي تعيين الكتلة هو أنه لا علاقة للأولى بقوة الجاذبية بينما أساس الثانية هو وجود هذه القوة .

وتسأل الآن هل نحصل على نفس النتيجة إذا عينا النسبة بين الكتلتين بكل من الطريقتين السابقتين ؟ وتعطينا التجارب إجابة صريحة على هذا السؤال . النتيجة هى نفسها بالضبط فى الحالتين ! هذه النتيجة التى كان من المستحيل التنبؤ بها مبنية على المشاهدة لأعلى المنطق . دعنا لغرض التبسيط نسمى الكتلة المعينة بالتجربة الأولى كتلة القصور الذاتى أو الكتلة القاصرة والأخرى المعينة بالتجربة الثانية كتلة الجاذبية . هاتان الكتلتان متساويتان فى الكون الذى نعيش فيه ولكن يمكننا أن نتصور إمكان عدم تساويهما وينشأ السؤال الآخر الآتى فوراً : هل تساوى هاتين الكتلتين مجرد صدفة أم له مغزى أعمق من ذلك ؟ يجيب علم الطبيعة الكلاسيكى على هذا السؤال كما يأتى : تساوى هاتين الكتلتين مجرد مصادفة

ولا يوجد أى مغزى له أما إجابة علم الطبيعة الحديث فعكس ذلك تماما : تساوى هاتين الكتلتين شئ أساسى يكون دليلا هاما يؤدي إلى فهم أعمق للموضوع . ولقد كان هذا الدليل فى الواقع أحد الأدلة العظيمة الأهمية التى أدت إلى تكوين النظرية المسماة بالنظرية النسبية العامة .

تبدو القصص البوليسية تافهة إذا فسرنا فيها الأحداث الغريبة كصادفات وتكون القصة شيقة أكثر إذا تبعت حوادثها نظاما معينا . بنفس الطريقة تكون النظرية التى تفسر تساوى كتلتى الجاذبية والقصور الذاتى بنظرية التى تجعل من هذا التساوى مصادفة بحتة ، على شرط أن تكون كلا من النظريتين متفقة مع الحقائق المشاهدة .

حيث أن تساوى كتلتى الثقائل والقصور الذاتى كان ضروريا لتكوين النظرية النسبية ، فإنه يحق لنا أن نبحثه هنا بعمق . ماهى التجارب التى تقنعنا بأن الكتلتين متساويتان ؟ والإجابة هى تجربة جاليليو القديمة . فى هذه التجربة ألقى جاليليو كتلا مختلفة من برج فلاحظ أن الزمن اللازم لسقوط كل منها كان واحداً . أى أن حركة الجسم الساقط لا تتوقف على كتلته . لربط هذه النتيجة العملية البسيطة ذات الأهمية البالغة بتساوى الكتلتين نحتاج إلى منطق معقد .

يتحرك جسم ساكن نتيجة لتأثير قوة خارجية ويكتسب بذلك سرعة معينة . ونتوقف سرعته على كتلة قصوره الذاتى فمقاومته للحركة تكون أكبر إذا كانت كتلته أكبر . ويمكننا أن نقول دون أن ندعى الدقة : يتوقف تأثير القوى الخارجية على جسم ما على كتلة قصوره الذاتى . إذا كانت الأرض تجذب جميع الأجسام بقوى متساوية ، فلا بد أن يكون سقوط الأجسام التى كتلة قصورها الذاتى كبيرة أبطأ من سقوط الأجسام التى كتلة قصورها الذاتى صغيرة . ولكن الحالة تختلف عن ذلك : جميع الأجسام تسقط بنفس الطريقة . وعلى ذلك يتحتم أن تكون قوة جذب الأرض للكتل المختلفة مختلفة . ولكن الأرض تجذب الأجسام بقوة الجاذبية ولا توجد لها أية علاقة بكتلة القصور الذاتى . والقوة التى نسميها قوة جذب الأرض تتوقف على كتلة الجاذبية . ولكن حركة الحجر الناتجة تتوقف على كتلة

القصور الذاتى . وحيث أن هذه الحركة الناتجة عن قوة الجاذبية واحدة دائماً (جميع الأحجار الساقطة من نفس الارتفاع تسقط بنفس الطريقة) ، على ذلك يتحتم أن تكون كتلة الجاذبية هي نفس كتلة القصور الذاتى .

وقد يصوغ عالم الطبيعة القانون السابق فى الصيغة الغامضة الآتية :

تزداد عجلة الجسم الساقط بزيادة كتلة جاذبيته وتناسب معها ، وتتناقص بتناقص كتلة قصوره الذاتى وتناسب معها . وحيث أن جميع الأجسام الساقطة لها نفس العجلة فيتحتم أن تتساوى الكتلتان . فى قصتنا الغامضة لا توجد مسائل حلت حلاً كاملاً وانتهى منها إلى الأبد . فبعد ثلاثمائة عام اضطررنا أن نعود إلى مسألة الحركة الأولية وذلك لزاجع طريقة البحث ولنجد أدلة كنا قد أهملناها ، بذلك حصلنا على صورة مختلفة للكون المحيط بنا .

نظريّة السبال للحرارة :

سنبدأ هنا فى تتبع دليل جديد ينشأ عن ظواهر الحرارة . ومع ذلك فمن المتعذر تقسيم العلم إلى أقسام متفرقة لا علاقة بينها . والواقع أننا سنجد أن المبادئ التى سنبحسها هنا وتلك التى درسناها فعلاً والتى سندرسها فيما بعد تكون جميعها شبكة متداخلة . وفى كثير من الأحيان يمكن تطبيق طريقة بحث فرع معين من فروع العلم عند بحث فروع أخرى مختلفة . وفى الغالب تعدل النظريات الأولى بحيث تفيد فى فهم كل من الظواهر الأصلية التى نشأت منها هذه المبادئ والظواهر الجديدة التى تطبق عليها هذه النظريات الآن .

والمبادئ الأساسية التى تلزم لوصف الظواهر الحرارية هى الحرارة ودرجة الحرارة . ولقد استغرق التمييز بين هذين المبدأين زمناً طويلاً فى تاريخ العلم ، يصعب تصديقه ، ولكن سار التقدم بخطى واسطة بعد هذا التمييز . سنبحث هذين المبدأين ونوضح الفرق بينهما ، رغم أنهما الآن شيئان مألوفان لكل إنسان نستطيع بحاسة اللمس أن نميز الأجسام الساخنة والباردة . ولكن هذا اختبار نوعى فقط لا يكفى لوصف كى ، بل أنه يجلب الغموض فى بعض الأحيان ، ويمكن

ملاحظة ذلك بتجربة بسيطة مشهورة . نفرض أن لدينا ثلاثة أواني تحتوى الأولى على ماء بارد والثانية على ماء فاتر والأخيرة على ماء ساخن . إذا غمسنا إحدى اليدين فى الماء البارد والأخرى فى الساخن فإننا نحصل على رسالة من الأولى تنبئ بالبرودة ورسالة من الثانية تنبئ بالسخونة إذا غمسنا بعد ذلك اليدين معا فى نفس الماء الفاتر فإننا نحصل على رسالتين متناقضتين واحدة من كل يد . لنفس السبب يكون رأى أحد رجال الاسكيمو فى جو نيويورك فى الربيع مختلفاً عن رأى أحد سكان المناطق الحارة ، فالأول يعتقد أنه حار والثانى يظن أنه بارد . نتخلص من هذه المشكلات بواسطة الترمومتر وهو آلة صممها جاليليو فى صورة بدائية . هنا أيضاً يقابلنا هذا الإسم المشهور ! ويعتمد استعمال الترمومتر على بعض الفروض الطبيعية الواضحة التى نتذكرها باقتباس أسطر قليلة من محاضرات ألقاها بلاك منذ أكثر من مائة وخمسين عاماً ، وبلاك هو الرجل الذى ساهم بمجهود كبير فى التغلب على الصعوبات المتعلقة بفكرتى الحرارة ودرجتها .

« إذا أخذنا ألفاً أو أكثر من أنواع المادة المختلفة مثل المعادن والأحجار والأملاح والريش والصوف والماء وغيره من الموائع ، وكانت هذه الأشياء ذات درجات مختلفة مبدئياً ، ثم وضعناها جميعاً فى حجرة واحدة لا توجد فيها مدفأة ولا تدخلها الشمس فإن الحرارة تنتقل من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة وقد يستغرق ذلك مدة ساعات أو يوم ، وإذا استعملنا ترمومتراً فى نهاية هذه الفترة ووضعناه على كل من هذه الأجسام فإنه يشير دائماً إلى نفس الدرجة .

وحسب التسمية الحديثة يلزم تغيير الجملة ذات حرارات مختلفة إلى ذات درجات حرارة مختلفة .

وقد يفكر الطبيب الذى يأخذ الترمومتر من فم رجل مريض كما يأتى :
يبين الترمومتر درجة حرارة نفسه بواسطة طول عموده الزئبقى . سنفرض أن طول عمود الزئبقى يزداد بالتناسب مع زيادة درجة الحرارة : ولكن الترمومتر يبق ملامساً للمريض الذى أعالجه عدة دقائق ، فتكون درجة حرارة الترمومتر هى نفس درجة

حرارة المريض . وعلى ذلك استنتج أن درجة حرارة هذا المريض هي التي يسجلها الترمومتر وربما كان الطبيب يعمل بطريقة ميكانيكية ولكنه في الواقع يطبق نظريات طبيعية دون أن يفكر فيها .

ولكن هل يحتوى الترمومتر على نفس مقدار الحرارة الموجودة في جسم الرجل ؟ طبعا لا . إن اقتراحنا أن الجسمين يحتويان على نفس الكمية من الحرارة نتيجة لتساوي درجتي حرارتهما يكون ، كما أشار بلاك :

« رأيا متسرعا في الموضوع ، ومعنى ذلك أننا نمزج بين كمية الحرارة الموجودة في جسم وبين شدة هذه الحرارة رغم وضوح أنهما شيان مختلفان يجب التمييز بينهما عند التفكير في توزيع الحرارة .

يمكننا فهم هذا التمييز بواسطة تجربة بسيطة للغاية . إذا وضعنا رطلا من الماء فوق لهب الغاز فإن درجة حرارته تتغير من درجة حرارة الحجرة إلى درجة الغليان بعد فترة معينة من الزمن . وإذا استبدلنا هذا الرطل باثنى عشر رطلا من الماء أو أكثر ووضعناها في نفس الإناء وفوق نفس اللهب فإنها تستغرق وقتا أطول بكثير من الفترة السابقة لكي تصل إلى درجة الغليان . هذه التجربة تبين أنه يلزم في الحالة الأخيرة كمية أكبر من « شيء ما » ويسمى هذا « الشيء » حرارة . ونحصل على مبدء آخر ، الحرارة النوعية ، من التجربة الآتية : إذا احتوى إناء على رطل من الماء وإناء آخر على رطل من الزئبق وسخن الإناءان بنفس الطريقة فإننا نلاحظ أن الزئبق يسخن بسرعة تفوق بكثير السرعة التي يسخن بها الماء أى أن « الحرارة » اللازمة لرفع درجة حرارة الزئبق درجة واحدة أقل من الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء درجة واحدة أيضا وعلى العموم تلزم كميات مختلفة من « الحرارة » لتغير درجة حرارة الكتل المتساوية من المواد المختلفة (مثل الماء والزئبق والحديد والنحاس والخشب الخ) ، درجة واحدة (من ٤٠ إلى ٤١ فهرنهايت مثلا) . ونعبر عن ذلك فنقول أن لكل مادة سعتها الحرارية أو حرارتها النوعية الخاصة بها .

مادمنا قد توصلنا إلى فهم فكرة الحرارة ، فإنه يمكننا أن نبحث في طبيعتها بالتفصيل لدينا جسمان الأول ساخن والآخر بارد ، أو بعبارة أخرى درجة حرارة الأول أعلى من درجة حرارة الثاني . نزيل جميع المؤثرات الخارجية ونجعل هذين الجسمين يتلامسان . نعلم أن الجسمين يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد مضي فترة من الزمن . ولكن كيف يتم ذلك ؟ ماذا يحدث بين اللحظة التي يبدأ فيها التلامس بينهما وبين اللحظة التي تتساوى فيها درجتا الحرارة ؟ يمكننا أن نتصور أن الحرارة « تنساب » من جسم لآخر كما ينساب الماء من مستوى مرتفع إلى مستوى منخفض . ورغم بساطة هذه الفكرة فإنها تتفق مع كثير من الحقائق ، ويكون التناظر كما يأتي :

الماء	الحرارة
المستوى المرتفع	درجة الحرارة العالية
المستوى المنخفض	درجة الحرارة المنخفضة

ويستمر الانسياب إلى أن يصبح الارتفاعان ، أي درجتى الحرارة ، متساويين ويمكن بالبحث الكمي الاستفادة من وجهة النظر البدائية هذه . إذ خلطت كتلة معينة من الماء ذات درجة حرارة معلومة بكتلة أخرى معينة من الكحول . في درجة حرارة أخرى (لاتساوى درجة حرارة الماء) فمن الممكن الحصول على درجة الحرارة النهائية للمخلوط إذا علمت الحرارة النوعية لكل من الماء والكحول . وبالعكس ، إذا علمت درجة حرارة المخلوط النهائية يمكن بعد قليل من العمليات الجبرية الحصول على النسبة بين الحرارتين النوعيتين .

تبين وجود أوجه شبه بين المبادئ المتعلقة بالحرارة التي ندرسها الآن وبين المبادئ الطبيعية الأخرى . فالحرارة من وجهة نظرنا هي جسم سيال كالكتلة في الميكانيكا . وقد تنذر كمية الحرارة أو قد تبقى ثابتة ، مثل المال يمكن إنفاقه كما يمكن حفظه في خزانة وكما أن مقدار المال الموجود في خزانة لا يتغير مادامت هذه الخزانة مقفلة فإن مقدار كل من الكتلة والحرارة في جسم معزول يبقى ثابتا . وزجاجة

الترموس المثالية تناظر هذه الخزانة . وزيادة على ذلك ، لا يضيع شيئاً من الحرارة حتى لو اتسابت من جسم لآخر مثلها في ذلك مثل كتلة مجموعة منزلة لا تنهيك حتى ولو عانت تحويلاً كيميائياً . وحتى لو استعملت الحرارة في إذابة الثلج مثلاً أو في تحويل الماء إلى بخار بدلاً من استعمالها في رفع درجة حرارة جسم فإننا نستمر في التفكير على أنها جسم سيال وأن من الممكن الحصول عليها ثانية بأكملها بتحويل الماء إلى ثلج أو بتحويل البخار إلى ماء والأسماء القديمة مثل حرارة الانصهار الكامنة ، حرارة التبخير الكامنة ، تبين أن هذه الأسس نشأت من التفكير في الحرارة كشئ ذي كيان والحرارة الكامنة هي حرارة مخفية مؤقتاً مثل المال المحفوظ في خزانة الذي يمكن الحصول عليه واستعماله إذا علمت كيفية فتح الخزانة .

ولكن من المؤكد أن كيان الحرارة يختلف عن كيان الكتلة . يمكننا أن نستدل على الكتل بواسطة الموازين ، ولكن هل للحرارة وزن ؟ هل يكون وزن قطعة حديد ساخنة إلى درجة الاحمرار أكبر من وزنها وهي باردة كالثلج ؟ تدلنا التجربة على أن قطعة الحديد لها نفس الوزن في الحالتين . إذا كانت الحرارة شيئاً فإنه شيء لا وزن له ، وقد جرت العادة في الماضي على تسمية الحرارة « كالوريك^(١) » وهي أول ما عرف من مجموعة الأشياء التي لا وزن لها . وستسمح لنا فرصة فيما بعد لكي نتتبع تاريخ هذه المجموعة ودراسة كيفية ظهورها وتلاشيها . ونكتفي الآن بملاحظة مولد هذا العضو الخاص من هذه المجموعة .

الفرض من أية نظرية طبيعية هو تفسير أكبر مدى ممكن من الظواهر ، ويبرر وجود نظرية ما بمقدرتها على تفسير الحوادث وجعلها مفهومة . لقد رأينا أن نظرية السيل للحرارة تفسر كثيراً من الظواهر الحرارية ، ومع ذلك سيظهر في القريب العاجل أن هذا ليس إلا دليلاً زائفاً ، وأن من المستحيل اعتبار الحرارة شيئاً سيالاً حتى ولو كان هذا الشئ عديم الوزن . ويتضح ذلك من الرجوع إلى بعض التجارب البسيطة التي ميزت بدء الحضارة .

المادة لا يمكن الحصول عليها من اللاشئ ولا يمكن إضاعتها ، ولكن

الإنسان الأول ولد النار بالاحتكاك وأحرق بها الخشب . وأمثلة التسخين بواسطة الاحتكاك كثيرة جداً ومألوفة بدرجة تغني عن ذكرها . في جميع هذه الحالات تتولد كمية من الحرارة وهي حقيقة يصعب تعليلها بنظرية السيال ، وقد يحاول مؤيدو هذه النظرية تعليل هذه الظاهرة وقد تكون محاولتهم كما يأتي : « يمكن بواسطة نظرية السيال تفسير تولد هذه الحرارة . لنعتبر مثلاً بسيطاً ، حالة ذلك قطعة من الخشب بقطعة أخرى منه . ذلك هو شيء يؤثر في الخشب وينير خواصه ، ومن الجائز جداً أن تعدل هذه الخواص بحيث تنتج درجة حرارة أعلى دون أن تتغير كمية الحرارة نفسها ، ونحن لا نشاهد إلا تغيراً في درجة الحرارة . من الجائز أن الاحتكاك يغير الحرارة النوعية للخشب ولا يؤثر على كمية الحرارة الكلية » .

ولا توجد أية فائدة ترجى من مناقشة مؤيدى نظرية السيال في هذه المرحلة ، وذلك لأنه لا يمكن حسم هذه المسألة إلا بالتجربة . نفرض أن قطعتين من الخشب متساويتان من جميع الوجوه ولنتصور أن تغيراً متساوياً قد اعتري درجة حرارتهما بطريقتين مختلفتين ؛ في الأولى بالاحتكاك وفي الثانية بلامسة جسم ساخن مثلاً . إذا كانت الحرارة النوعية لكل من قطعتي الخشب واحدة في درجة الحرارة الجديدة فلا يوجد أى أساس لنظرية السيال . . هناك طرق بسيطة للغاية لتعيين الحرارة النوعية ، ويتوقف مصير النظرية على نتيجة قياس الحرارتين النوعيتين السابقتين . وتتكرر الاختبارات التي تستطيع أن تصدر حكماً بالحياة أو الموت على نظرية ما كثيراً في تاريخ علم الطبيعة ، وهي تسمى تجارب حاسمة . والذي يقرر إذا كانت التجربة حاسمة أم لا هو صيغة السؤال نفسه ، ولا يمكن اختبار أكثر من نظرية واحدة بتجربة واحدة من هذا النوع . . والتجربة التي نعين فيها الحرارة النوعية للجسمين من نوع واحد وصلاً إلى نفس درجة الحرارة الأول بالاحتكاك والثاني بانسياب الحرارة إليه من جسم آخر هي مثال على هذا النوع من التجارب الحاسمة . . وقد أجرى رمفورد هذه التجربة منذ حوالي مائة وخمسون عاماً وبذلك قضى نهائياً على نظرية السيال للحرارة .

ويقص رمفورد قصته فيقول :

« كثيراً ما يحدث في الحياة العملية العادية أن تسنح فرص لدراسة الأمور الطبيعية الغريبة ، وقد تُجرى كثير من التجارب الفلسفية المهمة دون مشقة أو تكاليف وذلك باستخدام الآلات التي صممت لاستعمالها في الفنون والصناعات . وكثيراً ما سنحت لى شخصياً الفرصة بمشاهدة ذلك ، وأنا مقتنع بأن الملاحظة الدقيقة لكل ما يجري في الحياة العملية تؤدي إلى أسئلة مفيدة وإلى طرق للبحث والتحسين أكثر من التي يحصل عليها الفلاسفة في الساعات الطويلة المخصصة لدراساتهم المركزة ، وقد يظهر أننا نحصل على هذه النتائج بمجرد الصدفة أو نتيجة للتخيلات التي يتيه فيها العقل نتيجة لما اعتاد الإنسان مشاهدته .

وبينا كنت أشرف منذ فترة وجيزة على صناعة المدافع في المصانع الحربية بميونخ ، أثارت انتباهي درجة الحرارة العالية التي تصل إليها بندقية من البرونز في وقت قصير أثناء فحرها ، وأيضاً الحرارة الشديدة (أعلى بكثير جداً من درجة حرارة الماء المغلي كما وجدت بالتجربة) لشظايا المعدن المتطايرة منها بواسطة المثقاب .

من أين تأتي هذه الحرارة التي تظهر في العملية الميكانيكية السابقة ؟

هل تنشأ من شظايا المعدن المنفصلة بواسطة المثقاب من كتلة المعدن الصلبة ؟ إذا كان هذا هو الواقع . فحسب النظرية الحديثة للحرارة الكامنة ونظرية السيل للحرارة يجب أن تتغير الحرارة النوعية ، ويجب أن يكون التغير كبيراً بدرجة تعلل وجود كل هذه الحرارة .

والواقع أنه لم يحدث أي تغير ، فقد أخذت كيتين متساويتين من هذه القطع المتطايرة ومن شرائح مصقولة من نفس كتلة المعدن بمشار دقيق ورفعتها إلى درجة حرارة واحدة (درجة حرارة غايان الماء) ووضعتهما في كيتين متساويتين من الماء البارد (درجة حرارته ٥٩.٤ ف) فلم نلاحظ أي اختلاف بين درجة حرارة الماء الذي وضعت فيه القطعة المتطايرة ودرجة حرارة الماء الذي وضعت فيه شرائح المعدن .

وأخيراً وصل إلى النتيجة الآتية :

وعند البحث في هذا الموضوع يجب أن نتذكر أن منبع الحرارة التي ظهرت بالاحتكاك في التجارب السابقة يظهر كأن من المستحيل استنفاده . ومن الواضح أن الشيء الذي يمكن لجسم معزول ، أو لمجموعة منعزلة من الأجسام الاستمرار في منحه دون حد لا يمكن أن يكون شيئاً مادياً . ويظهر لي أن من الصعب جداً إن لم يكن من المستحيل تكوين فكرة واضحة لأي شيء يمكن إيجاده ونقله بنفس الطريقة التي توجد وتنقل بها الحرارة في هذه التجارب ، إلا إذا كان هذا الشيء هو الحركة .

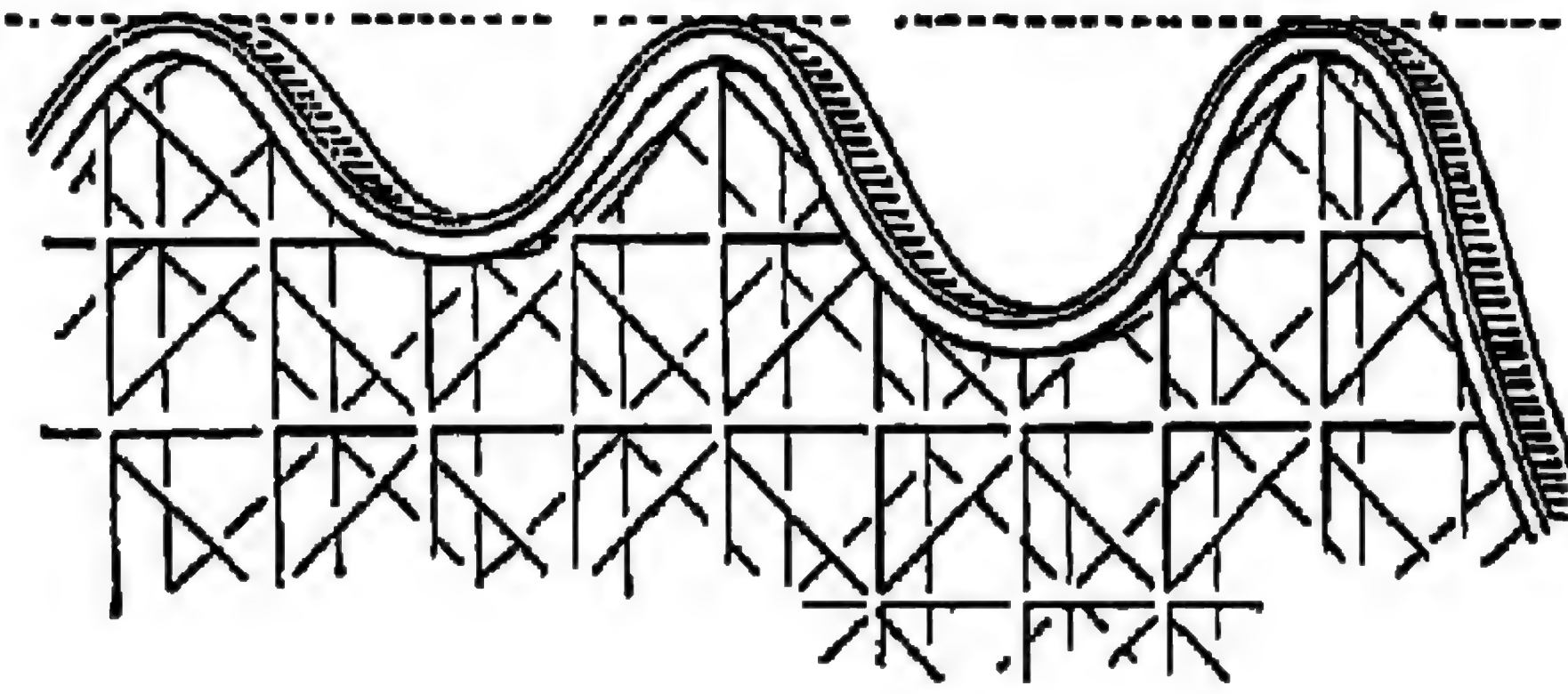
بذلك نرى انهيار النظرية القديمة ، أو بعبارة أدق نرى أن نظرية السيل لا يمكن تطبيقها إلا على مسائل انسياب الحرارة . ويجب علينا الآن (كما لاحظ رمفورد) أن نبحث عن دليل جديد .

من أجل ذلك سنترك موضوع الحرارة مؤقتاً ونعود إلى الميكانيكا .

عربة الملهي :

تعال بنا الآن بتتبع حركة تلك الملهة الشبيهة السماء بـ « عربة الملهي » . ترفع عربة مهيرة أو تدفع إلى أعلى موضع في مسار متموج وعند تركها حرة تبدأ في الدحرجة تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية فتأخذ في الارتفاع والانخفاض على خط منحنى شديد الانحدار يتغير إتجاهه بكثرة ؛ ويجد الراكب في ذلك لذة كبيرة نتيجة للتنيرات المفاجئة في السرعة . وأثناء الحركة جميعها لا تصل العربة مطلقاً إلى نفس الارتفاع الابتدائي ويصعب وصف الحركة وصفاً كاملاً ، ففضلاً عن الجانب الميكانيكي من المسألة ، أي التنير في السرعة والموضع بمضي الزمن ، يوجد الاحتكاك الذي يولد الحرارة على القضبان والمجالات . والمغزى الوحيد لتقسيم هذه العملية الطبيعية إلى هاتين الوجهتين هو التمكن من استعمال المبادئ التي درسناها فيما سبق . ويؤدي هذا التقسيم إلى تجربة مثالية ، إذ أنه من الممكن أن نتخيل العملية الطبيعية التي لا يظهر فيها إلا الجانب الميكانيكي ولكن يستحيل تحقيقها عملياً .

للحصول على هذه التجربة المثالية ، نتصور أن أحد الأشخاص تمكن من التخلص تماماً من الاحتكاك الذي يصاحب الحركة باستمرار . وأن هذا الشخص قرر أن يطبق اكتشافه على تصميم « عربة ملاحى » . يجب أن يعلم هذا الشخص كيف يصمم مثل هذه العربة . ستسير العربة إلى أعلى وإلى أسفل مبتدئة من نقطة على ارتفاع مائة قدم عن سطح الأرض مثلاً . يكتشف الرجل بعد وقت قصير من التجربة ومن الخطأ ، أنه يتحتم عليه اتباع قاعدة بسيطة للناية . يستطيع أن يبنى الطريق كما يشاء بشرط أن تكون نقطة الابتداء هي أعلى نقطة فيه وإذا كانت العربة ستتحرك حركة حرة إلى نهاية المسار ، يمكن للمهندس أن يجعلها ترفع إلى مائة قدم أى عدد من المرات . ولكن يتحتم ألا تتعدى العربة هذا الارتفاع .



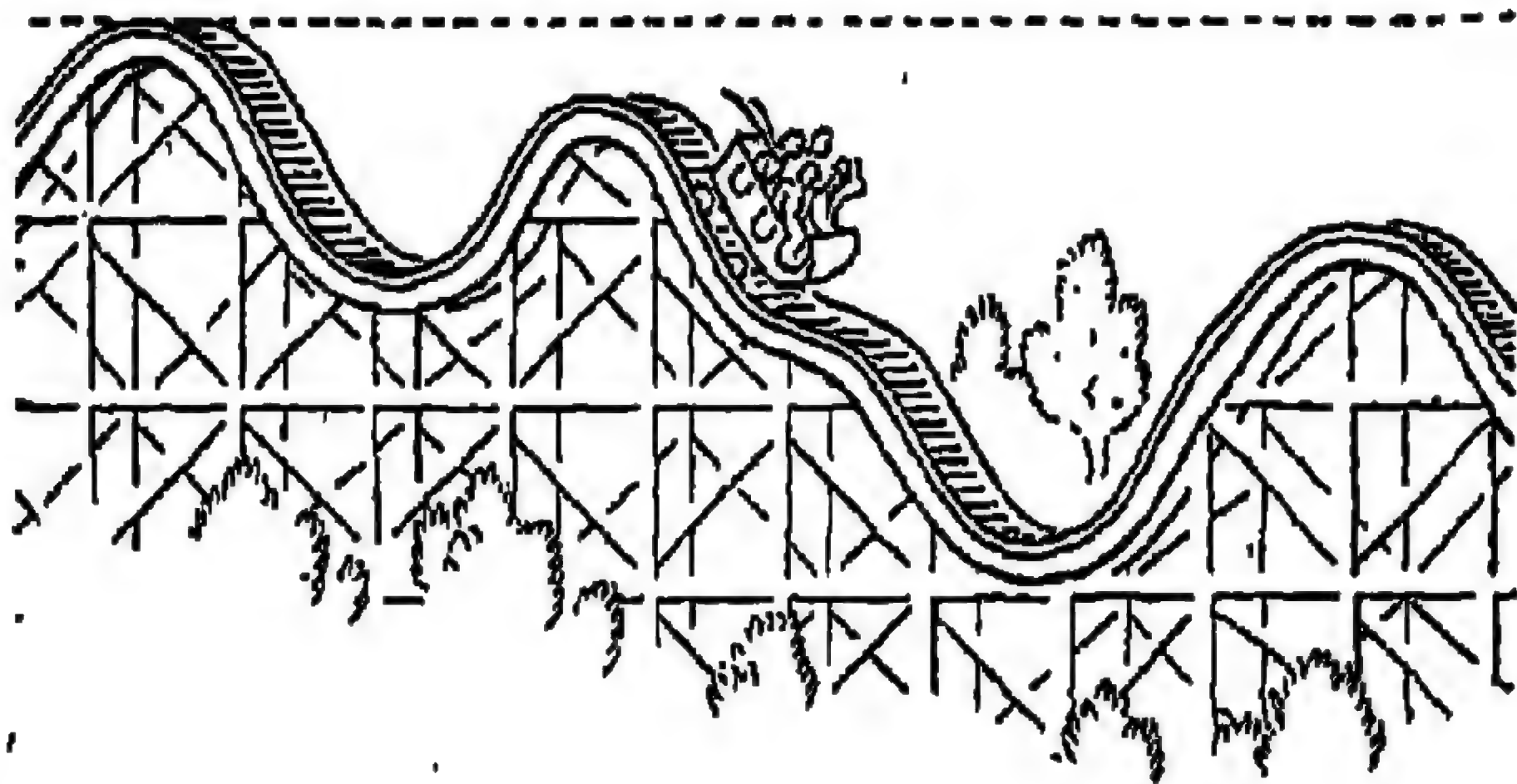
وفى المسار الحقيقى يستحيل على العربة أن تصل إلى ارتفاعها الابتدائى وذلك لوجود الاحتكاك ؛ ولكن يمكن إهمال ذلك فى هذه التجربة المثالية .

تبدأ العربة فى التدحرج من النقطة الأصلية . ينقص ارتفاع العربة عن سطح الأرض كلما تحركت بينما تزداد سرعتها . وقد تذكرنا هذه الجملة الأخيرة لأول وهلة بجملة فى أحد دروس اللغة . « لا يوجد مئى قلم ولكن يوجد مئى ستة برتقالات » ولكن جملتنا ليست بهذه السخافة . لا توجد أية علاقة بين عدم وجود قلم مئى وبين وجود ست برتقالات مئى ، ولكن يوجد ارتباط واقعى بين ارتفاع العربة عن سطح الأرض وبين قيمة سرعتها . ويمكننا إيجاد قيمة سرعة العربة فى أية لحظة إذا علم ارتفاعها عن سطح الأرض ، ولكننا لن نتعرض لهذا الموضوع لطالبعه الكفى ؛ وأفضل طريقة للتعبير عنه هي بواسطة القوانين الرياضية .

عند أعلى نقطة كانت سرعة العربة تساوى صفراً وكان ارتفاعها مائة قدم .
وفي أسفل نقطة ممكنة يكون ارتفاعها عن الأرض صفراً وسرعتها نهاية عظمى .
يمكن التعبير عن هذه الحقائق بطريقة أخرى . عند أعلى نقطة يكون للعربة « طاقة وضع » ولا يكون لها « طاقة حركية » وفي أسفل نقطة تكون « طاقة حركتها »
نهاية عظمى « وطاقة وضعها » صفراً . وعند أى نقطة متوسطة حيث يكون للعربة
ارتفاع وسرعة يكون لها طاقة حركية وطاقة وضع أيضاً . وتزداد طاقة الوضع
بازدياد الارتفاع بينما تزداد طاقة الحركة بازدياد السرعة . وتكفي مبادئ الميكانيكا
لشرح الحركة . ويحتوى الوصف الرياضى على تعبيرين للطاقة ، كل منهما يتغير
رغم أن مجموعهما ثابت . وعلى ذلك يكون من الممكن إدخال فكرة طاقة الوضع
التي تتوقف على الوضع وفكرة طاقة الحركة التي تعتمد على السرعة رياضياً وبطريقة
مضبوطة . وإدخال هذين الإسمين اختياري طبعاً وهو يتفق مع طبيعة هذين النوعين
المختلفين من الطاقة . ويسمى مجموع هاتين الكميتين ، الذي يبقى ثابتاً ، أحد
ثوابت الحركة .

ويمكن مقارنة الطاقة الكلية (طاقة الحركة وطاقة الوضع) مثلاً بمبلغ ثابت
من المال يتغير باستمرار من عملة لأخرى ، من دولارات إلى جنيهات مثلاً ،
وبالعكس حسب نظام تبادل معين .

وفي عربة الملاهى الحقيقية حيث يمنع احتكاك العربة من الوصول إلى ارتفاع
نقطة الابتداء ، يوجد أيضاً تذبذب مستمر فى طاقتى الوضع والحركة . ولكن لا يبقى
مجموع الطاقين ثابتاً فى هذه الحالة ولكنه يأخذ فى التناقص .



تلتزم الآن ، لربط الميكانيكا والحرارة ، خطوة أخرى جريئة هامة وسنرى فيما بعد كثير ، نتائج وتعميمات هذه الخطوة . .

لدينا الآن شيء آخر غير طاقتي الوضع والحركة وهو الحرارة التي يولدها الاحتكاك . هل تناظر هذه الحرارة التناقص في الطاقة الميكانيكية أى في طاقتي الوضع والحركة ؟ يبدو أن علينا أن نخمن تخميناً جديداً . إذا نظرنا إلى الحرارة كنوع من أنواع الطاقة ، فعمل مجموع هذه الأنواع الثلاث أى طاقة الوضع وطاقة الحركة والحرارة ، يظل ثابتاً . وليست الحرارة نفسها هي التي تشبه المادة في عدم تلاشيها ، ولكن الحرارة وأنواع الطاقة الأخرى مأخوذة معاً لا تتلاشى مطلقاً . يماثل ذلك حالة رجل يدفع لنفسه عمولة من الفرنكات عن تحويل دولارات إلى جنيفات بحيث يبقى مجموع الفرنكات والدولارات والجنيفات ثابتاً حسب نظام تحويل معين .

لقد حطم تقدم العلم النظرية القديمة التي تقول بأن الحرارة سيال ونحاول الآن الحصول على شيء آخر ، الطاقة ، تكون الحرارة إحدى صورته .

نظام التحويل :

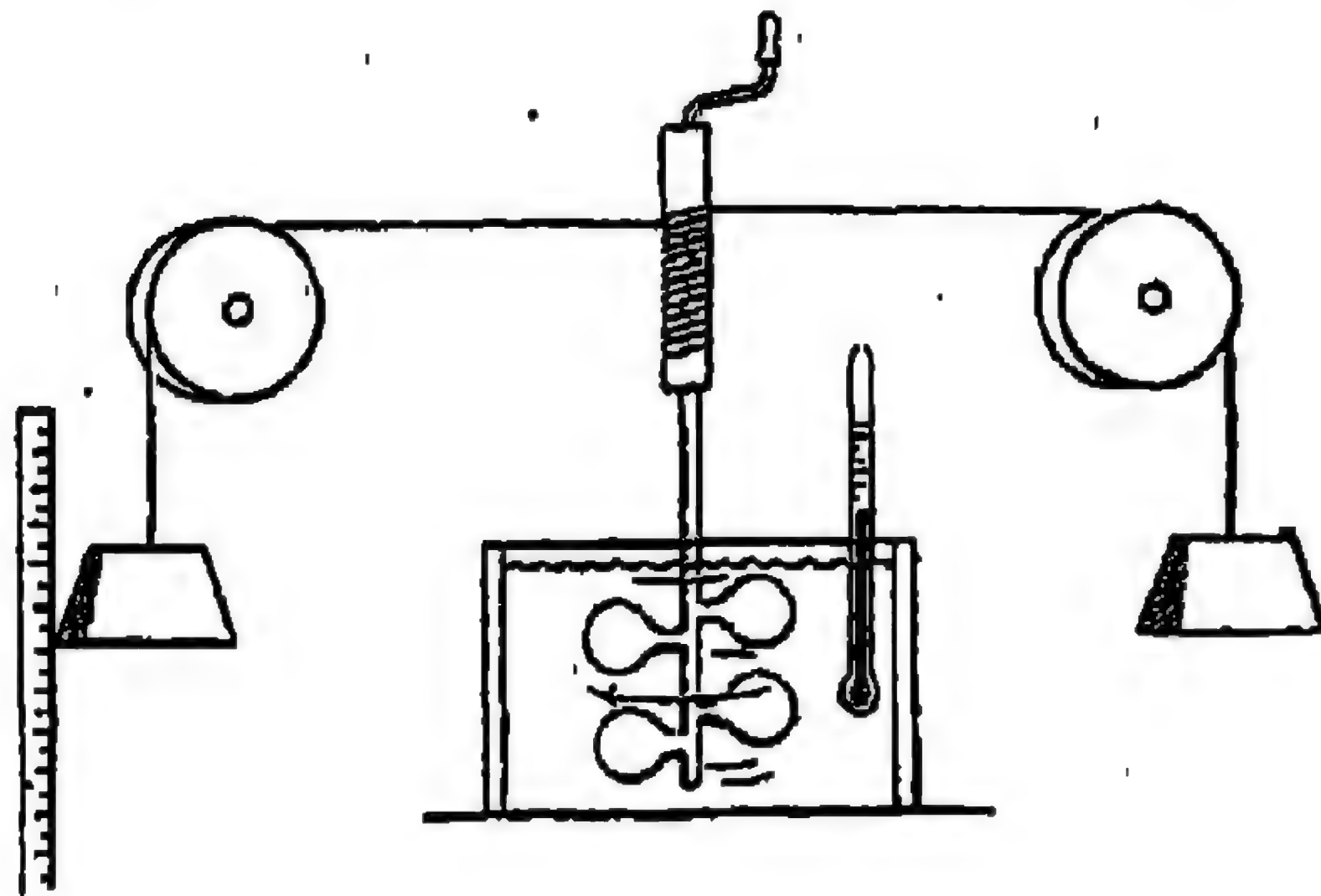
منذ أقل من مائة عام مضت ، خمن ماير الدليل الجديد الذي أدى إلى مبدأ اعتبار الحرارة كإحدى صور الطاقة . وقد حقق جول ذلك بالتجربة . من الصدفة الغريبة أن أغلب الأبحاث الأساسية المتعلقة بطبيعة الحرارة قام بها رجال لم يحترفوا العلم بل كانوا ينظرون إلى علم الطبيعة على أنه هواية مفضلة فقط . فالاسكتلندي بلاك كان له أكثر من حرفة واحدة والألماني ماير كان طبيباً ، والكونت رمفورد الأمريكي الذي عاش في أوروبا فيما بعد ، كان مغامراً كبيراً وكان حجم النشاط وقد أصبح في وقت من الأوقات وزيراً للحرب في بافاريا . وهناك أيضاً الإنجليزي جول الذي كان يشتغل بإنتاج الخمر والذي أجرى في وقت فراغه بعض تجارب في غاية الأهمية تتعلق بقاعدة بقاء الطاقة .

لقد حقق جول بالتجربة أن الحرارة هي إحدى صور الطاقة كما عين نظام التحويل .

تكون طاقتنا الوضع والحركة لمجموعة معينة الطاقة الميكانيكية للمجموعة ،
وفي حالة عربة الملاهي جال بخاطرنا أن بعض الطاقة الميكانيكية يتحول إلى حرارة .
إذا كان هذا صحيحاً فلا بد وأن يوجد في هذه العملية وفي جميع العمليات المشابهة
نظام معين للتحويل بين هذين النوعين من الطاقة . هذه مسألة رياضية ، ولكن
إمكان تحويل كمية من الطاقة الميكانيكية إلى مقدار معين من الحرارة هو في الواقع
في غاية الأهمية . نود أن نعلم العدد الذي يمثل نظام التحويل ، أي كمية الحرارة .
التي نحصل عليها من مقدار معلوم من الطاقة الميكانيكية .

وكان غرض جول من إبحائه هو تعيين هذا العدد . وتصميم إحدى تجاربه
يشبه كثيراً تصميم ساعة الثقل . وعند ملأ مثل هذه الساعة يرفع ثقلان وبذلك
تكتسب المجموعة طاقة وضع . وإذا لم تمس الساعة فإنه يمكن اعتبارها مجموعة مقفلة
ولكن الثقلان يسقطان بالتدريج وتسير الساعة . وبعد فترة زمنية معينة يصل
الثقلان إلى أسفل نقطة وتكون الساعة قد توقفت . ما الذي حدث للطاقة ؟ لقد
تحولت طاقة وضع الثقليين إلى طاقة حركة للمجموعة ثم ضاعت بعد ذلك تدريجياً
على هيئة حرارة .

وقد استطاع جول أن يقيس الحرارة المفقودة بجهاز من هذا النوع بعد تغييره
تغييراً ينطوي على الذكاء . وبذلك تمكن جول من تعيين نظام التحويل ، والثقلان
في جهازه يعملان عجلة بدالية تدور وهي مغموسة في ماء . فتحول طاقة وضع



الثقلين إلى طاقة حركة للأجزاء القابلة للحركة ثم إلى حرارة ترفع درجة حرارة الماء . وقد قاس جول هذا التغير في درجة الحرارة . وحيث أن حرارة الماء النوعية معلومة فقد تمكن بذلك من حساب كمية الحرارة التي استخدمت في التسخين . وقد لخص جول نتائج محاولاته كثيرة كما يلي :

أولاً : أن كمية الحرارة الناتجة عن احتكاك الأجسام الصلبة والسائلة يتناسب دائماً مع مقدار القوة (يقصد الطاقة) المبذولة .

ثانياً : أن الحصول على كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء (موزون في الفراغ ودرجة حرارته بين ٥٥ ، ٦٠) . درجة فرنهيتية واحدة يلزم بذل قوة (طاقة) ميكانيكية تمثل بسقوط ٧٧٢ رطلا مسافة قدم واحد .

وفي صيغة أخرى ، طاقة وضع ٧٧٢ رطل على ارتفاع قدم واحد من سطح الأرض تكافئ الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء من درجة حرارة ٥٥ ف إلى ٦٦ ف . ولقد أمكن الحصول على نتائج أدق لدرجة ما من التجارب التي أجريت بعد ذلك ولكن الهيكل الأساسي للمكافئ الميكانيكي للحرارة هو ما وجدته جول في عملة المدهش الأول .

ولقد سار التقدم سريعاً بعد الانتهاء من هذا العمل الهام . فلقد تبيننا بعد ذلك أن الطاقة الميكانيكية والحرارة هما صورتان من صور الطاقة العديدة . وكل شيء يمكن تحويله إلى إحدى هاتين الصورتين هو أيضاً إحدى صور الطاقة . الإشعاع الناتج عن الشمس طاقة لأن جزءاً منه يتحول إلى حرارة على الأرض . للتيار الكهربائي طاقة لأنه قد يسخن سلكاً أو قد يدير عجلات محرك . والفحم يمثل الطاقة الكيميائية التي تتحرر على هيئة حرارة عندما يحترق الفحم . وفي كل حدث من أحداث الطبيعة تتحول إحدى صور الطاقة إلى صورة أخرى حسب قانون تحويل معين دائماً . وفي حالة مجموعة مغلقة ، أي مجموعة معزولة عن جميع المؤثرات الخارجية تبقى الطاقة محفوظة وبذلك تكون خواصها مشابهة لخواص المادة . ويكون مجموع جميع الأنواع المختلفة للطاقة في هذه المجموعة ثابتاً رغم أنه من الممكن أن يتغير

مقدار أى نوع واحد منها . وإذا اعتبرنا الكون جميعه كمجموعة مقفلة يمكننا أن نعلن بفخار مع علماء الطبيعة فى القرن التاسع عشر أن طاقة الكون ثابتة لا تتغير وأن من المستحيل استحداث أى جزء منها أو إضاعته .

ونستطيع إذن أن نميز بين نوعين من الموجودات . المادة كما نعرفها والطاقة . كل من هذين النوعين يتبع قوانين احتفاظ بالذات ، فن المستحيل أن تتغير الكتلة الكلية أو الطاقة الكلية لمجموعة معزولة . المادة لها وزن والطاقة لا وزن لها . أى أن لدينا نوعين مختلفين من الموجودات ، وقانونى بقاء .

هل ظلت هذه الآراء صحيحة إلى الآن ؟ أم هل تغيرت هذه الصورة — التى تبدو كأنها ذات أساس متين — فى ضوء تطورات أحدث ؟ فى الواقع أنها تغيرت ! وترتبط التغيرات فى هذه المبادئ بالنظرية النسبية وسنعود إلى هذه النقطة فيما بعد .

الأساس الفيلسفى :

تؤدى نتائج البحث العلمى فى كثير من الأحيان إلى تغيير فى النظرة الفلسفية لمسائل تمتد إلى أبعد من مجال العلم الضيق . ماهو هدف العلم ؟ ماهو المطلوب من نظرية تحاول وصف الكون ؟ رغم أن هذه الأسئلة تتعدى حدود علم الطبيعة ، فإن لها علاقة قوية به وذلك لأن العلم هو السبب فى نشأتها . يجب أن تعمم النتائج العلمية فلسفيا ، وإذا كون هذا التعميم وقبل على نطاق واسع فإنه يؤدى فى كثير من الأحيان إلى تطورات أخرى فى التفكير العلمى وذلك لأنه يبين أحد الطرق الكثيرة التى يمكن سلوكها . وتؤدى الثورات الناجحة على المبادئ المسلم بها إلى تطورات مختلفة تماما وغير منتظرة . وتصبح هذه التطورات الجديدة منبعا لوجهات نظر فلسفية جديدة . ستبدو هذه الملاحظات فامضة وغير ضرورية إلى أن نوضحها بأمثلة من تاريخ علم الطبيعة .

سنحاول هنا وصف الأفكار الفلسفية الأولى عن غرض العلم . لقد كان لهذه الأفكار تأثير قوى على تطور علم الطبيعة إلى أن ظهرت أدلة جديدة (بعد حوالى

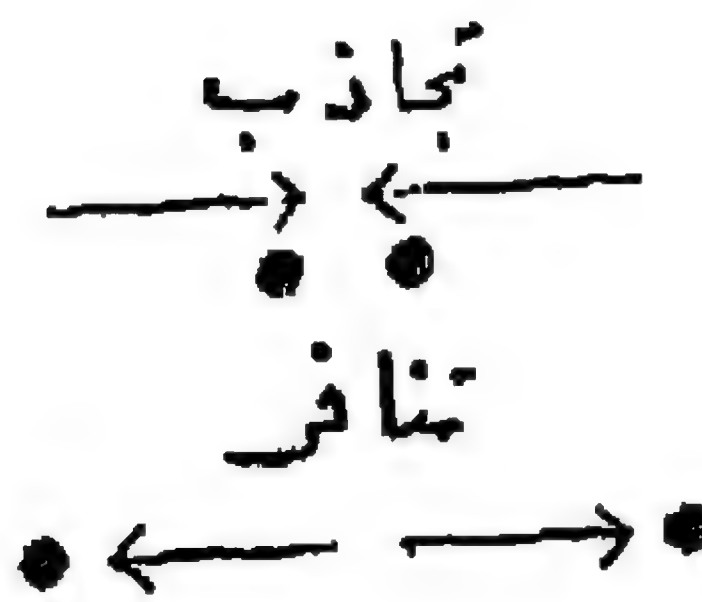
بمئة عام) وحقائق ونظريات جديدة كونت أساساً جديداً للعلم وحتمت ترك المبادئ القديمة .

والذي يبحث في تاريخ العلم كله ، من الفلسفة الإغريقية إلى علم الطبيعة الحديث يجد أن المحاولات كانت مستمرة لاختصار تعقد الغواهر الطبيعية إلى بعض المبادئ والعلاقات الأساسية البسيطة . وهذا هو أساس كل الفلسفة الطبيعية ويبدو هذا واضحاً حتى في عمل علماء الذرة . ومنذ ثلاثة وعشرون قرناً كتب ديموقراط :

« أنها لمسألة اتفاق أن نقول أن شيئاً حلوا أو مرأ أو ساخنا أو بارداً أو ذلولون معين . أما في الحقيقة فتوجد ذرات وفراغ أى أن الأشياء التي تشمر بوجودها بحواسنا ليست حقيقة كما تعودنا أن نعتبرها . الذرات والفراغ هما الشيطان الحقيقيان فقط » .

وتبقى هذه الفكرة في الفلسفة القديمة تصوراً عبقرياً لاغير . فالأغريق لم يكونوا يعلمون قوانين الطبيعة التي تربط الحوادث المتتابة . ولم يبدأ العلم الذي يربط بين النظرية والتجربة فعلاً إلا منذ جاليلو . لقد تبعنا الأدلة الأولى التي أدت إلى قوانين الحركة . لقد بقيت القوة والمادة الفكرتان الأساسيتان لجميع المحاولات التي بذلت لفهم الكون في مائتي عام من البحث العلمي . ويستحيل أن تصور إحدى هاتين الفكرتين بدون الأخرى ، لأن المادة يظهر وجودها كمنبع للقوة بتأثيرها على مادة أخرى .

فلنعتبر الآن أبسط الأمثلة . نقطتان ماديتان وقوى تؤثر بينهما ، وأسهل القوى في التخيل هي قوى الجذب والطرود . وفي كلتا هاتين الحالتين يقع متجه القوة على المستقيم الواصل بين النقطتين الماديتين . ويؤدي تبسيط الموضوع إلى حالة نقطتين ماديتين



كل منها تجذب أو تطرد الأخرى ، إذ أن أى فرض آخر عن القوى المؤثرة يعطى صورة أكثر تعقيداً . هل يمكننا أن نفرض فرضاً بسيطاً آخر عن طول متجهات القوة ؟ حتى إذا أردنا أن نتجنب الفروض الخاصة إلى حد كبير ، فإنه من الممكن

أن نقول : تتوقف القوة بين أى نقطتين ماديتين على البعد بينهما فقط ، مثل قوى الجاذبية . يبدو هذا بسيطاً . ويمكننا أن نتخيل قوى أكثر تعقيداً من ذلك مثل القوى التى تتوقف على البعد بين النقطتين الماديتين وأيضاً على سرعتيهما . وإذا أخذنا المادة والقوة كعقيدين أساسيتين ، فإن من الصعب تخيل فروض أبسط من القول بأن القوى تعمل فى المستقيم الواصل بين النقطتين بأنهما تتوقف فقط على البعد بينهما ولكن هل من الممكن وصف جميع الظواهر الطبيعية بدلالة قوى من هذا النوع فقط . ؟

إن نتائج الميكانيكا العظيمة فى كل الفروع ، ونجاحها الباهر فى تطور علم الفلك وتطبيق مبادئها على مسائل مختلفة ليست لها صلة ظاهرة بالميكانيكا قد ساعدت على الاعتقاد بإمكان اختصار جميع الظواهر الطبيعية إلى قوى بسيطة تعمل بين أشياء لا تتغير . وتظهر هذه المحاولة ، سواء كانت مقصودة أم لا ، فى جميع الاكتشافات العلمية التى حدثت فى القرنين اللذين تليا عهد جاليليو . وقد ذكر هلمهولتز ذلك بوضوح فى حوالى منتصف القرن التاسع عشر : « وإذن نكتشف أخيراً أن مشكلة علم الطبيعة المادى هى أن نرجع بالظواهر الطبيعية ثانياً إلى قوى جاذبة وطاردة لا تتغير ولا تتوقف شدتها إلا على البعد . ويتوقف فهم الكون على حل هذه المسألة » .

أى أنه حسب رأى هلمهولتز يكون اتجاه تطور العالم محدداً وطريقه معيناً . « وستنتهى رسالته بمجرد أن يتم اختزال الظواهر الأساسية إلى قوى بسيطة وبمجرد أن ثبت أن هذا هو الاختزال الوحيد الممكن لهذه الظواهر » . تظهر هذه الفكرة كأنها بدائية وسخيفة بالنسبة إلى عالم طبيعة فى القرن العشرين فما يخيفه أن يتصور أن من الممكن الانتهاء من مغامرات البحث الكبرى والحصول على صورة ثابتة للكون لا تتغير بمرور الزمن ولا تثير الاهتمام إن لم تكن خاطئة .

ورغم أن هذه المبادئ تختصر وصف جميع الحوادث إلى قوى بسيطة ، فإنها لا تحدد

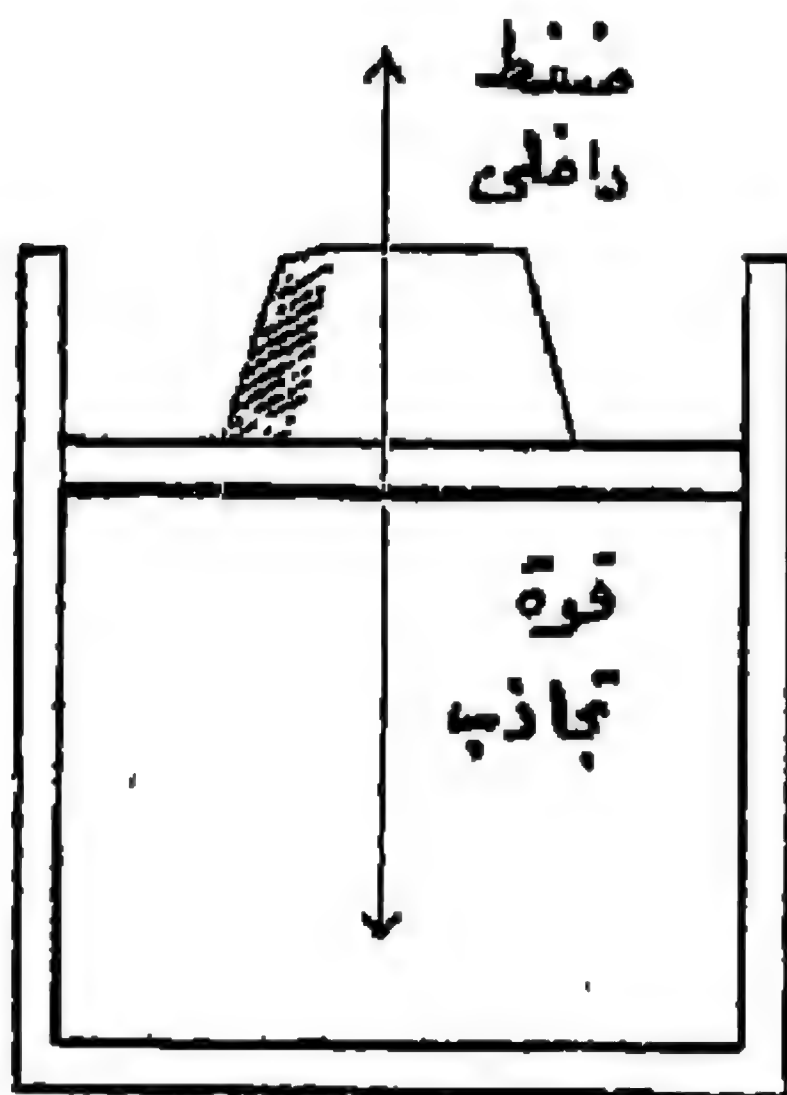
العلاقة بين القوى وبين البعد . ومن الممكن أن تختلف هذه العلاقة باختلاف الظواهر الطبيعية . وطبعاً يكون إدخال أنواع مختلفة من القوى للآحداث المختلفة غير مناسب من وجهة النظر الفلسفية . ومع ذلك فإن هذا الرأي ، المسمى « وجهة النظر الميكانيكية » الذى صاغه هلهولتز بوضوح ، قد لعب دوراً هاماً فى وقته . وتكوين نظرية الحركة للمادة هو أحد النتائج الهامة للاتجاه الميكانيكي . وقبل أن نشاهد زوال هذا الاتجاه ، فلنوافق مؤقتاً على وجهة نظر علماء القرن الماضى ونرى ماذا يمكن استخلاصه من الصورة التى رسموها للعالم الخارجى .

نظرية الحركة للمادة :

هل من الممكن تفسير ظاهرة الحرارة بدلالة حركة جسيمات تتفاعل بقوى بسيطة ؟ نفرض أن لدينا وعاءً مقفلاً يحوى كتلة معينة من غاز ، الهواء مثلاً ، فى درجة حرارة معينة ، بالتسخين ترتفع درجة الحرارة وبذلك تزداد الطاقة . ولكن ماهى علاقة هذه الحرارة بالحركة ؟ إن الذى يجعلنا نعتقد فى وجود علاقة بين الحرارة والحركة شيئان ، الأولى وجهة النظر الفلسفية التجريبية المعترف بها والثانى هو تولد الحرارة بالحركة . إذا كانت جميع المسائل الموجودة فى الحياة مسائل ميكانيكية فلا بد وأن تكون الحرارة طاقة ميكانيكية . والنرض من نظرية الحركة هو التعبير عن المادة بهذه الطريقة . فحسب هذه النظرية نعتبر أى غاز كجموعة كبيرة العدد من الجسيمات أو الجزيئات تتحرك فى جميع الاتجاهات وتتصادم مع بعضها وتغير اتجاه حركتها بعد التصادم . ويجب أن توجد قيمة متوسطة لسرعة الجزيئات كما يوجد سن متوسط أو ثروة متوسطة لمجتمع إنسانى كبير . أى أن هناك طاقة حركة متوسطة لكل جزيء . وإزدیاد الحرارة فى الوعاء يعنى زيادة متوسط طاقة الحركة . وحسب هذه الصورة لا تكون الحرارة نوعاً خاصاً من الطاقة يختلف عن الطاقة الميكانيكية وإنما هى طاقة حركة الجزيئات . وينظر كل درجة حرارة معينة متوسط معين لطاقة الحركة لكل جزيء . والواقع أن هذا ليس فرضاً اختيارياً . إذا أردنا تكوين صورة ميكانيكية متماسكة للمادة فإنه يتحتم علينا أن نأخذ طاقة حركة الجزيء كقياس لدرجة حرارة الغاز .

وهذه النظرية ليست إحدى تخيلات العقل فقط . فمن الممكن البرهنة على اتفاق نظرية الحركة للنازات مع التجربة وعلى أنها تؤدي فعلاً إلى فهم أعمق للحقائق . ويمكن توضيح ذلك بأمثلة قليلة .

لدينا وعاء مغلق بمكبس يمكنه (أى المكبس) أن يتحرك بحرية . ويحتوى الوعاء على مقدار معين من غاز محفوظ فى درجة حرارة ثابتة . إذا كان المكبس ساكناً عند الابتداء فيمكننا أن نحركه إلى أعلى وإلى أسفل بتقليل أو زيادة الثقل الموضوع عليه . ولدفع المكبس إلى أسفل يلزم استعمال قوة تعمل ضد الضغط الداخلى للغاز . ما هى طريقة عمل الضغط الداخلى حسب نظرية الحركة ؟ تتحرك الجزيئات ذات العدد الهائل التى يتركب منها الغاز فى جميع الاتجاهات ، وهى تدق السطوح والمكبس وترتد ثانية (مثل كرات مقذوفة على حائط) . وهذا الدق المستمر بعدد كبير من الجزيئات يحفظ المكبس على ارتفاع معين وذلك بمعادلة قوى الجاذبية التى تؤثر إلى أسفل على المكبس والأثقال . تؤثر قوة الجاذبية الثابتة فى الاتجاه الأول بينما يؤثر عدد كبير من القوى غير المنتظمة الناتجة من تصادم الجزيئات فى الاتجاه الآخر . إذن لكي يحدث التوازن لا بد وأن تكون محصلة هذا القوى غير المنتظمة مساوية لقوة الجاذبية .



نفرض أن المكبس دفع إلى أسفل وأن حجم الغاز نقص نتيجة لذلك إلى جزء كسرى من قيمته الأولى — نصفه مثلاً — بينما تبقى درجة حرارته ثابتة . ماذا نتظر أن يحدث حسب نظرية الحركة ؟ هل سيكون تأثير القوى الناتجة عن دق الجزيئات على المكبس أكبر أو أقل من تأثيرها السابق ؟ تقترب الجزيئات الآن من بعضها بدرجة أكبر

منها أولاً . ورغم أن قيمة متوسط طاقة الحركة تبقى كما هى فإن عدد مرات تصادم الجزيئات مع المكبس يزداد (فى نفس الفترة الزمنية) وبذلك تكون القوة الكلية أكبر . واضح من هذه الصورة التى ترسمها نظرية الحركة أنه يلزم وضع ثقل آخر

لكي يبقى المكبس متزناً في هذا الوضع النخفض الجديد . هذه الحقيقة العملية البسيطة مألوفة تماماً ولكن يمكن الحصول عليها منطقياً من نظرية الحركة للمادة . وهناك تجربة أخرى : خذ وعاءين يحتويان على حجمين متساويين من غازين مختلفين الإيدروجين والنيتروجين مثلاً ، في درجة حرارة واحدة . افرض أن الوعاءين مغلقتان بمكبسين متماثلين تماماً وأن فوق كلا منهما ثقلاً متساوياً . باختصار ، هذا يعني أن كلا من الغازين له نفس الحجم ونفس درجة الحرارة ونفس الضغط . حيث أن درجة الحرارة واحدة ؛ ينتج حسب النظرية أن متوسط طاقة الحركة عن الجزيء له نفس القيمة في الحالتين وحيث أن الضغطين متساويان ، فإن القوة الكلية الناتجة عن تصادم الجزيئات بالمكبس تكون لها نفس القيمة في الحالتين . في المتوسط ، يكون لكل جزيء نفس طاقة الحركة وحيث أن لكل من نفس الحجم ، فإنه يتحتم أن يكون عدد الجزيئات الموجودة في كل منهما واحداً رغم أن الغازين مختلفان كيميائياً . لهذه النتيجة أهمية كبرى في فهم كثير من الظواهر الكيميائية وهي تعني أن عدد الجزيئات في حجم معين عند درجة حرارة معينة وضغط معين هو شيء لا يختلف من غاز لغاز وإنما ذو قيمة واحدة لجميع الغازات . ومن المدهش حقاً أنه فضلاً عن أن نظرية الحركة تؤدي إلى وجود هذا العدد فإنها تمكننا أيضاً من تعيينه . وسنعود إلى هذه النقطة في القريب العاجل .

تفسر نظرية الحركة للمادة كميّاً ونوعياً قوانين الغازات كما وجدت بالتجربة . وفضلاً عن ذلك فالنظرية لا تقتصر على الغازات ولكن نجحها الباهر كان في هذا المجال .

تمكن إسالة الغاز بخفض درجة الحرارة . ومعنى إنخفاض درجة حرارة مادة هو نقص متوسط كمية حركة جزيئاتها . وعلى ذلك يتضح أن متوسط حركة جزيء سائل أقل من متوسط طاقة حركة جزيء الغاز المناظر .

ولقد أزيح الستار عن حركة الجزيئات في السوائل أول مرة بما يسمى

« حركة براون » وهي ظاهرة مذهشة . وبدون نظرية الحركة للمادة تظل هذه الظاهرة غامضة وغير مفهومة . وقد لاحظ عالم النبات براون هذه الظاهرة لأول مرة ولم تفسر إلا في بداية القرن الحالى أى بعد ثمانين عاماً .

والجهاز الوحيد الذى يلزم لمشاهدة حركة « براون » هو الميكروسكوب ، وليس من الضروري أن يكون الميكروسكوب المستعمل من نوع ممتاز .

وكان براون يشتغل على حبيبات نباتات معينة أى :

« جسيمات ذات حجم كبير بدرجة غير مألوفة ويتراوح طول الواحدة من $\frac{1}{4000}$ إلى $\frac{1}{1000}$ من البوصة . » كما يقول براون . ونقتبس مما كتبه براون :

« عند فحص هذه الجسيمات مغموسة فى الماء ، لاحظت أن كثيراً منها يتحرك وبعد إعادة المشاهدة مرات عديدة اقتنعت بأن هذه الحركات لم تنشأ عن تيارات فى المائع ولا عن تبخره التدريجى وإنما ترجع إلى الجسم نفسه . »
والذى لاحظته براون هو الإثارة المستمرة للحبيبات عند ما تنفس فى الماء ، ويمكن رؤية ذلك بالميكروسكوب . وأنه لمنظر يؤثر فى النفس .

هل ترتبط هذه الظاهرة بنبات معين فقط ؟ أجاب براون على هذا السؤال بإعادة التجربة على نباتات مختلفة كثيرة ووجد أن جميع الحبيبات المختلفة تتحرك حركة مشابهة . وزيادة على ذلك وجد نفس هذا النوع من عدم الاستقرار لا فى جسيمات المواد العضوية فقط وإنما لجسيمات المواد غير العضوية أيضاً . وحتى قطعة صغيرة مطحونة من تمثال قديم حققت نفس الظاهرة .

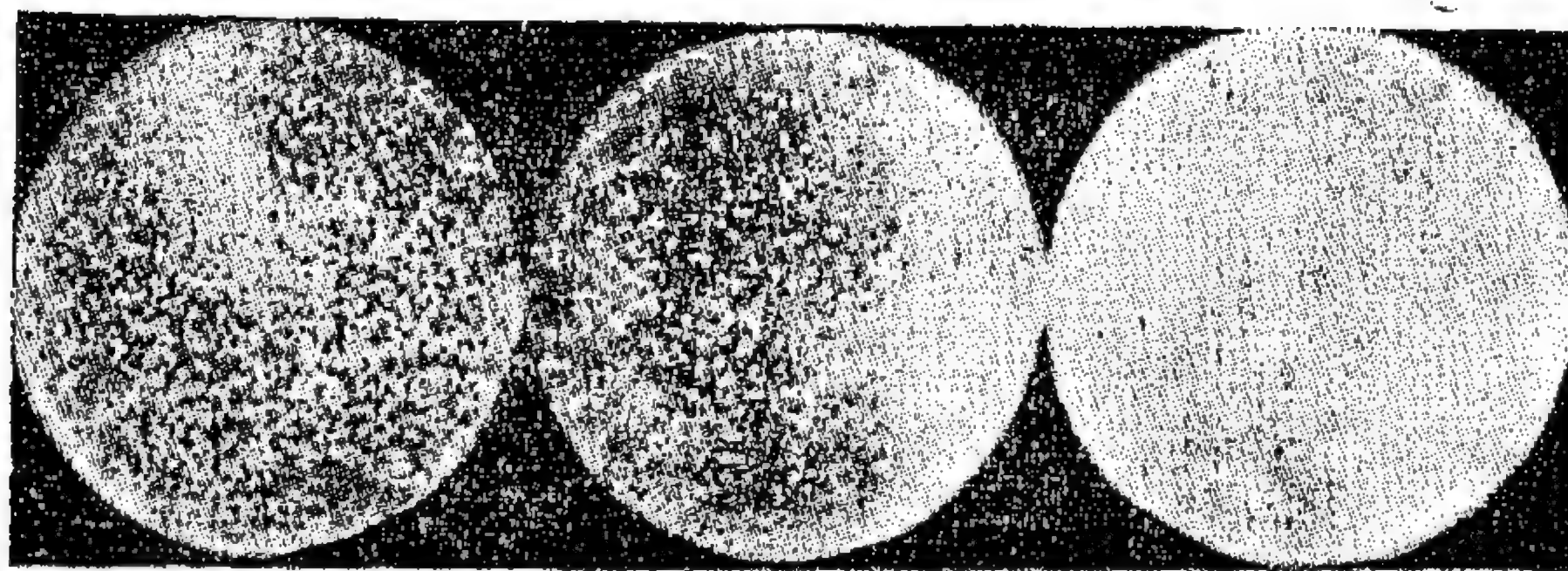
كيف تفسر هذه الحركة ؟ إنها تظهر كأنها تتعارض مع كل ما قبلناه فيما سبق . فملاحظة موضع جسيم معلوم واحد كل نصف دقيقة مثلاً ، تريح الستار عن مساره العجيب . والشئ الذى يكاد لا يصدق حقاً هو الصفة المستمرة الظاهرة للحركة . إذا وصفنا بندول يتأرجح فى ماء فإنه يسكن بعد فترة من الوقت إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية أخرى . ووجود حركة مستمرة يبدو متعارضاً مع كل

التجارب السابقة . وتتغلب على هذه الصعوبة بطريقة مدهشة بتطبيق نظرية الحركة للمادة .

إذا استعملنا أقوى الميكروسكوبات التي في حيازتنا ونظرنا إلى الماء فإنه يتعذر علينا رؤية الجزيئات أو حركاتها كما تصورها لنا نظرية الحركة للمادة . وعلى ذلك إذا كانت النظرية التي تنص على أن الماء هو مجموعة جزيئات صحيحة فلا بد وأن يكون حجم هذه الجزيئات أصغر من أصغر حجم يمكن رؤيته بأقوى الميكروسكوبات . بالرغم من ذلك دعنا نعتقد بصحتها وبأنها تعطينا صورة للحقيقة . إن جسيمات براون التي نراها إذا نظرنا بالميكروسكوب تتحرك مندفعة نتيجة لتسلط الجزيئات التي تكون الماء عليها رغم أن حجم هذه الجزيئات أصغر منها . وتنشأ حركة براون إذا كانت الجسيمات المندفعة صغيرة بدرجة كافية . وحركة هذه الجسيمات غير منتظمة لأن تسلط جزيئات السائل عليها غير منتظم ، ولا يمكن إيجاد قيمة متوسطة له نتيجة لعدم انتظامه فالحركة التي نشاهدها هي في الواقع نتيجة للحركة التي يتعذر مشاهدتها . وخواص الجسيمات الكبيرة تعكس إلى حد ما خواص الجزيئات . ويمكن التعبير عن ذلك في صيغة أخرى بأن نقول أن صفات الجسيمات هي صورة مكبرة لصفات الجزيئات بدرجة تجعل في الإمكان ملاحظتها بالنظر في الميكروسكوب ، وخواص مسار جسيم براون غير المنتظم (أى المسار) ، والذي لا يوجد ارتباط بينه وبين الزمن يدل على أن خواص مسارات الجزيئات الصغيرة التي تكون المادة ، تكون غير منتظمة أيضاً بطريقة مشابهة . وعلى ذلك نرى أن الدراسة الكمية لحركة براون تجعل نظرنا يصل إلى أطراف بعيدة من نظرية الحركة . من الواضح أن حركة براون التي نشاهدها تتوقف على حجم وكتلة الجزيئات المتسلطة . ولن تكون هناك حركة ما إذا لم يكن لهذه الجزيئات المتسلطة كمية معينة من الطاقة ، أى إذا لم يكن لها كتلة وسرعة ، لذلك لا ندهش إذا علمنا أن دراسة حركة براون قد تؤدي إلى تعيين كتلة الجزيء .

لقد تكونت نظرية الحركة كماً لبحوث نظرية وعملية قاسية والدليل الذي ظهر نتيجة لحركة براون كان أحد الأدلة التي أدت إلى النتائج الكمية ويمكننا

اللوحة الأولى



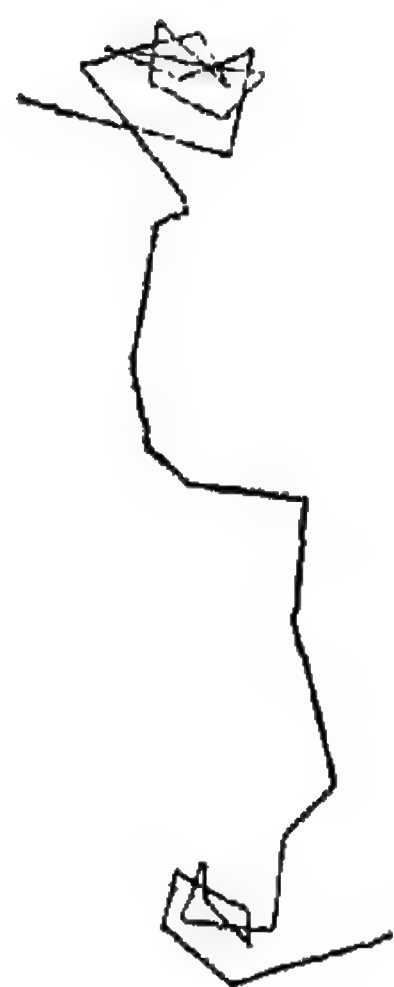
(أخذ الصورة ف بيران)

جسيمات براون كما ترى خلال الميكروسكوب

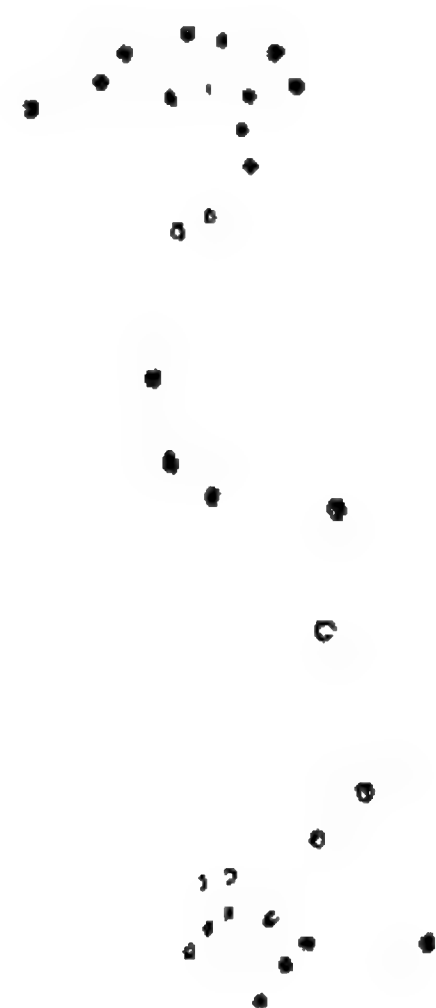


(أخذ الصورة برمبرج وفائيلوف)

أحد جسيمات براون كما صور بتعريض وتغطية سطح



المسار التقريبي مستنتجاً من
هذه الأوضاع المتتالية



أوضاع متتالية لأحد
جسيمات براون

الحصول على نفس هذه النتائج بطرق مختلفة ميتدين بأدلة أخرى مختلفة . وأنها حقيقة ذات أهمية كبيرة أن كل هذه الطرق تؤيد نفس وجهه النظر وذلك لأنها توضح تماسك وتناسق نظرية الحركة للمادة .

سندكر هنا واحدة فقط من هذه النتائج الكمية الكثيرة التي حصل عليها نظرياً وعملياً . نفرض أن لدينا جراماً من أخف العناصر وهو الأيدروجين . ماهو عدد الجزيئات الموجودة في هذا الجرام الواحد ؟ إن الإجابة على هذا السؤال لا تكون مميزة للأيدروجين وحده بل لجميع الغازات لأننا نعلم الشروط التي تحتها يحتوى غازين مختلفين على عدد واحد من الجزيئات .

تمكننا النظرية ، بعد الحصول على قياسات معينة تتعلق بحركة براون من الإجابة على هذا السؤال والجواب هو عدد كبير جداً بدرجة يصعب تصديقها . عدد الجزيئات الموجودة في جرام من الأيدروجين هو

$$3.03,000,000,000,000,000,000,000$$

تخيل أن حجم جزيئات الأيدروجين قد كبر بدرجة تمكننا من رؤيتها بالميكروسكوب ، كأن يصبح قطر الجزيء مثلاً ، قسماً واحداً من خمسة آلاف قسم من البوصة أى مثل قطر جسيم براون . لحفظ هذه الجزيئات يلزمنا صندوق مكعب طول ضلعه يساوى ربع ميل .

يمكننا بسهولة أن نحسب كتلة أحد الجزيئات الأيدروجين هذه ، وذلك بقسمة « ١ » على العدد المذكور فيما سبق . والجواب هو كمية صغيرة للغاية .

$$33 \dots \dots \dots 0,000 \dots \dots \dots \text{جرام}$$

والتجارب التي أجريت على حركة براون هي بعض التجارب المستقلة الكثيرة التي أدت إلى تعيين هذا العدد الذي يلعب دوراً هاماً للغاية في علم الطبيعة . ونلاحظ في نظرية الحركة للمادة وفي جميع نتائجها تحقق المبدأ الفلسفي العام :
جمل تفسير الظواهر يتوقف فقط على التفاعل بين جزيئات المادة .

ونلخص ما سبق كما يأتي

« في الميكانيكا يمكن التنبأ بالمسار الذي سيرسبه جسم متحرك إذا علمنا حالته الراهنة والقوى التي تؤثر عليه ، فمثلاً يمكننا معرفة المسارات التي ستسير فيها جميع الكواكب في المستقبل . والقوى الفعالة هي قوى نيوتن الجاذبية التي تتوقف على البعد فقط . والنتائج العظيمة للميكانيكا الكلاسيكية تقوى الاعتقاد بإمكان تطبيق وجه النظر الميكانيكية باستمرار على جميع فروع علم الطبيعة وبأنه يمكن تفسير جميع الظواهر بدلالة قوى تمثل إما الجذب أو الطرد وتتوقف على البعد وتؤثر بين جسيمات لا تتغير .

في نظرية الحركة للمادة ، نرى كيف أن هذا الاتجاه ، الذي نشأ من مسائل ميكانيكية ، يفسر ظاهرة الحرارة ويؤدي إلى رسم صورة ناجحة لتكوين المادة .

الباب الثاني

تداعى وجهة النظر الميكانيكية

[المائعان الكهربائيان — الموائع المغناطيسية — الصعوبة الجديدة الأولى —
سرعة الضوء — النظرية الجسيمية للضوء — لفر اللون — ماهى الوجة؟ —
النظرية الموجية للضوء — هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة —
الأمير ووجهة النظر الميكانيكية] .

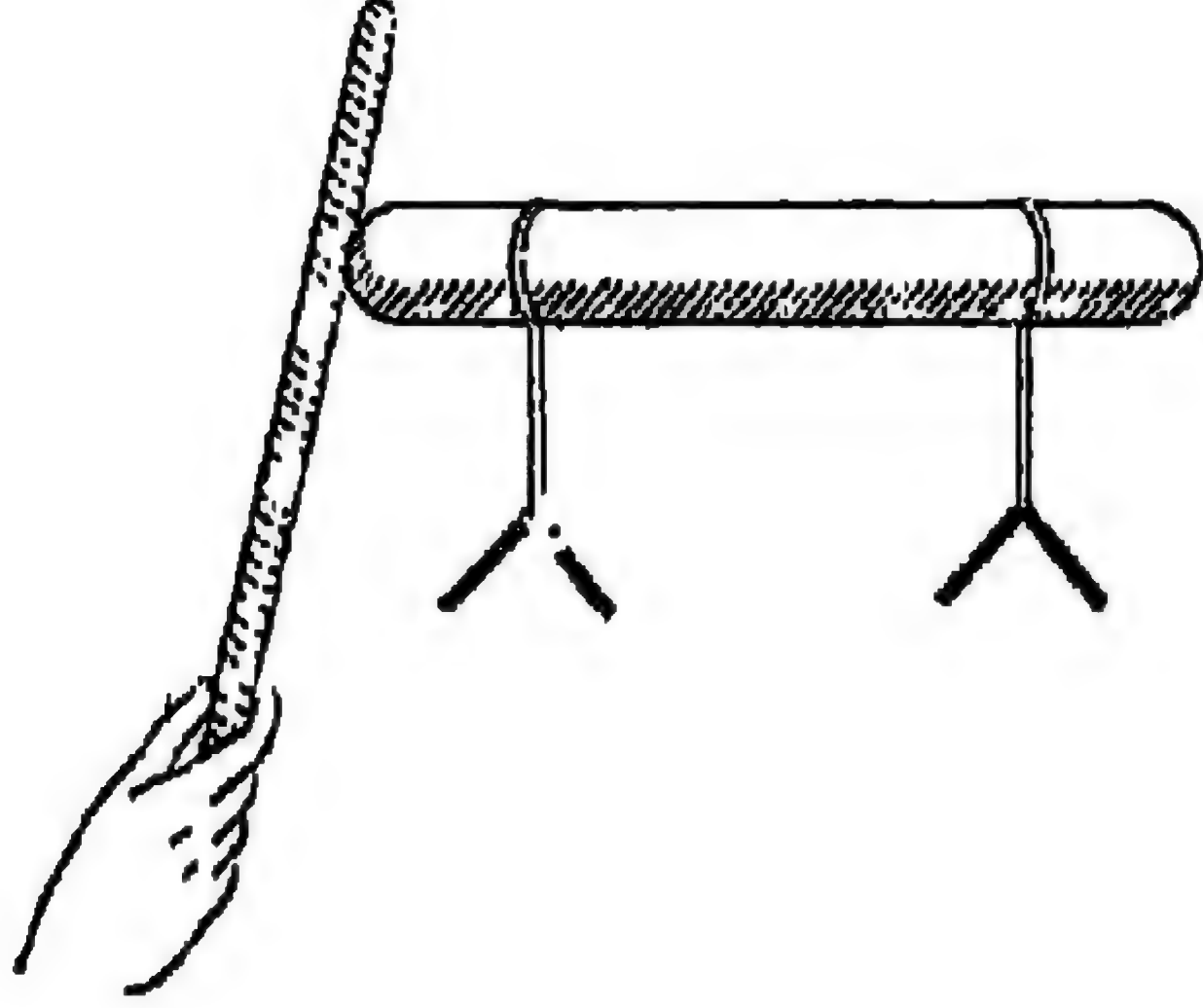
المائعان الكهربائيان :

تحتوى الصفحات التالية على وصف ممل لتجارب فى غاية البساطة ، ممل لسبيين
الأول هو أن وصف التجارب ، دون إجرائها فعلا ، لا يثير الاهتمام ، والثانى
هو أن معنى هذه التجارب لن يتضح حتى تظهره النظرية التى ستصل إليها ، وغرضنا
هو إعطاء مثال جيد يوضح الدور الذى تلعبه النظريات فى علم الطبيعة .

١ — قضيب معدنى محمول على قاعدة زجاجية ويتصل كل من طرفى القضيب
بواسطة سلك بالكتروسكوب . ماهو الاليكتروسكوب ؟ هو جهاز بسيط أجزاءه
الرئيسية هى ورقتان ذهبيتان معلقتان فى نهاية قطعة معدنية قصيرة . والمجموعة
محفوطة داخل إناء زجاجى بحيث لا يمس المعدن إلا الأجسام غير المعدنية أو المواد
العازلة كما تسمى . وفضلا عن الاليكتروسكوب والقضيب الزجاجى لدينا قضيب
من المطاط الخشن . وقطعة من قماش الفانلة .

وتجرى التجربة كما يأتى — يتأكد أولا من أن ورقتى الذهب متقاربتان دون
انفراج لأن هذا هو وضعها العادى . إذا فرض أن الورقتين لم تكونا فى هذا
الوضع . يمكن إعادتهما إلى الوضع العادى بلمس القضيب المعدنى . بعد القيام بهذه
العمليات الأولية نذلك قضيب المطاط بشدة بواسطة قماش الفانلة . ثم نجعله يلامس

المعدن . فتتفرج الورقتان على الفور . وتبقى الورقتان منفرجتين . حتى بعد إبعاد قضيب المطاط .

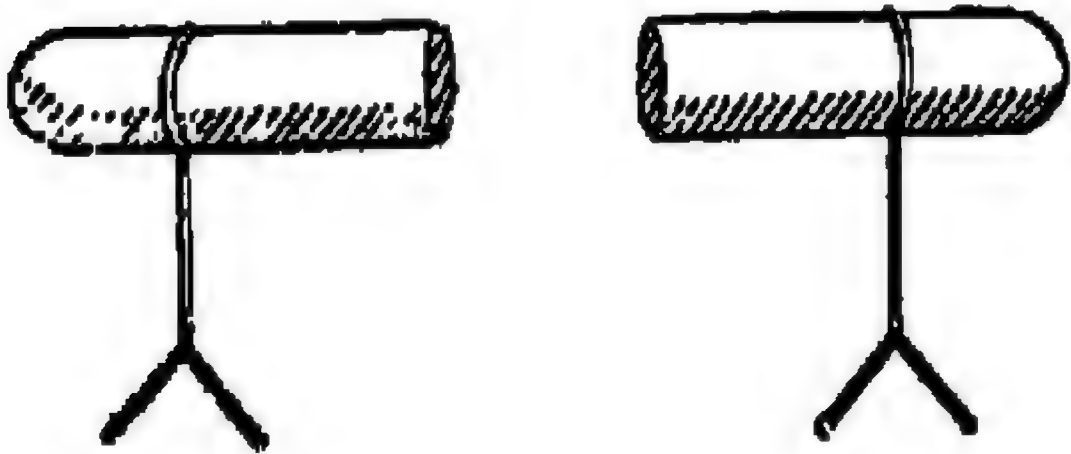


٢ — تجرى تجربة أخرى

باستعمال نفس الجهاز السابق بحيث تكون الورقتان منطبتين عند بدء التجربة . في هذه التجربة نجعل قضيب المطاط يقترب من المعدن دون أن يلامسه مرة أخرى فتتفرج الورقتان . وإذا

أبعدنا قضيب المطاط عن المعدن دون أن يلامسه فإن الورقتين تنطبتان على الفور وتمودان إلى وضعهما العادي على عكس الحالة السابقة التي تبقى فيها الورقتان منفرجتان حتى بعد إبعاد قضيب المطاط .

٣ — في التجربة الثالثة سنحدث تغييراً طفيفاً في الجهاز — نفرض أن القضيب المعدني يتكون من جزئين متصلين ببعضهما — ندلك قضيب المطاط بقماش القانلة مرة أخرى ، ونقربه من المعدن . نشاهد نفس الظاهرة ، أي انفراج ورقتي الذهب نفصل الآن بين جزئي القضيب المعدني . ثم نبعد قضيب المطاط . نلاحظ أن ورقتي الذهب تبقيان منفرجتين في هذه الحالة بدلا من إنطباقيهما كما في التجربة الثانية



يصب إثارة الاهتمام بهذه التجارب بالبسيطة الأولية وربما كان الذي يجريها في العصور الوسطى ينال التأنيب . وهي تبدو لنا مملة وغير منطقية . ويصعب

إعادة هذه التجارب دون لبس بعد قراءة واحدة لهذا الوصف . وقد تفهم هذه التجارب لو علمنا شيئاً عن الموضوع . بل إنه يمكننا أن نقول أن احتمال إجراء مثل هذه التجارب دون فكرة سابقة محددة عن معناها هو احتمال بعيد للغاية .

سنبين الآن الفكرة الأساسية لنظرية بسيطة تفسر جميع الحقائق التي وصفناها فيما سبق .

يوجد مائتان كهربائيتان يسمى أحدهما موجب (+) والآخر سالب (-) . وهما يشبهان لحد ما نظرية السيل التي سبق شرحها فكما في حالة الحرارة يبقى مقدار هذين المائتين في أية مجموعة معزولة ثابتا رغم ازدياده أو نقصه في أى فرد من أفراد هذه المجموعة . ولكن يوجد فرق أساسى بين هذه الحالة وبين حالة الحرارة أو المادة أو الطاقة . لدينا نوعان من السيل الكهربائى ولا يمكن هنا تشبيه الكهرباء بالعملة كما فعلنا فيما سبق إلا إذا عممنا هذا التشبيه بعض الشيء . يقال أن جسم متعادل كهربائيا إذا كان المائتان الكهربائيتان (الموجب والسالب) يلاشى كل منهما الآخر بالضبط : وإذا كان شخص لا يملك شيئا فإما أن يكون هذا الشخص ليس لديه مال على الإطلاق وإما أن يكون المبلغ الذى يحفظه في خزانته يساوى تماما مجموع ما عليه من الديون ويمكننا مقارنة المبلغ الموجود في خزانة هذا الشخص بالمائع الكهربائى الموجب وديونه بالمائع الكهربائى السالب .

والفرض التالى فى النظرية هو أن المائتين الكهربائيتين اللذين من نوع واحد يتنافران (يطرد كل منهما الآخر) وإذا كانا من نوعين مختلفين فإن كلاهما يجذب الآخر . ويمكن تمثيل ذلك بالرسم كما يأتى .

ويبقى فرض نظرى ضرورى آخر : يوجد نوعان من الأجسام ، النوع الأول « الأجسام الموصلة للكهرباء » يمكن لهذين المائتين الحركة فيه بحرية ، والنوع الثانى « الأجسام العازلة » لا يمكن للمائتين الحركة فيها . ويتعذر على المائتين الحركة فيها . ويجب ألا يفهم القارئ أن أى جسم هو إما عازل أو موصل . فالموصل والعازل المثالان لا يوجدان إلا فى الخيال ولا يمكن الحصول على أيهما فعلا . فالمعادن والأرض وجسم الإنسان كلها توصل الكهرباء ولكن ليس

$\begin{matrix} + \\ \bullet \end{matrix} \leftarrow \begin{matrix} - \\ \bullet \end{matrix}$

$\begin{matrix} - \\ \bullet \end{matrix} \leftarrow$

$\begin{matrix} - \\ \bullet \end{matrix} \rightarrow$

$\begin{matrix} + \\ \bullet \end{matrix} \leftarrow$

$\begin{matrix} + \\ \bullet \end{matrix} \rightarrow$

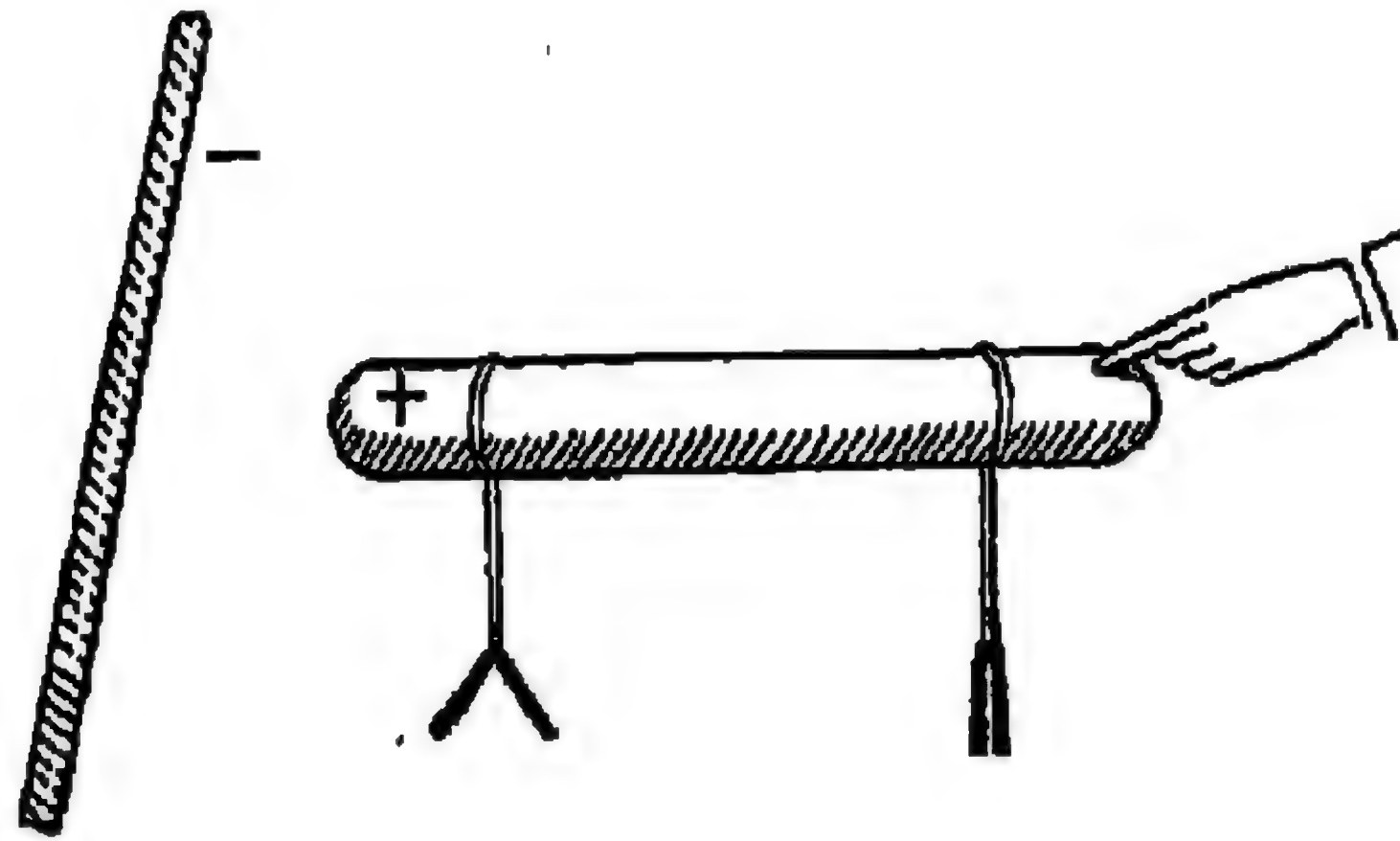
بنفس الدرجة . والزجاج والمطاط والصيني ومماثلها تعزل الكهرباء . أما الهواء فهو يعزل الكهرباء بدرجة محدودة فقط كما يعلم أى شخص يشاهد التجارب التى وصفناها : وقد جرت العادة أن تعزى النأج السيئة لتجارب الكهربائية الساكنة (التجارب الالكتروستاتيكية) إلى رطوبة الهواء وهو عذر جد مقبول .
تكفى هذه الفروض النظرية لتفسير التجارب التى وصفناها .

١ — قضيب المطاط متعادل كهربائياً فى الظروف العادية مثله فى ذلك مثل جميع الأجسام الأخرى . وهو يحتوى على مقدارين متساوين من المائعين الموجب والسالب . وهذه العبارة اصطلاح محض لأننا نطبق فيها الأسماء التى أوجدتها النظرية لى تمكن من وصف عملية ذلك . ويسمى نوع الكهرباء الذى يزداد مقداره (عن مقدار النوع الآخر) فى قضيب المطاط بعد ذلك سالباً ، ومن المؤكد أيضاً أن هذا الاسم مسألة اتفاق فقط . وإذا دللنا قضيباً من الزجاج بفراء قط ، فحسب ما اتفق عليه يكون نوع الكهرباء الزائد موجباً . لنبدأ الآن فى التجربة . نحضر مائعاً كهربائياً إلى المعدن وذلك بملاسته للمطاط . وفى المعدن يمكن للمائع الكهربائى أن يتحرك بحرية . وعلى ذلك فإنه ينتشر على سطح المعدن جميعه بما فيه الورقتان الذهبيتان . وحيث أن تأثير الكهرباء السالبة على الكهرباء السالبة هو التنافر فإن كلا من الورقتين تحاول أن تبتعد عن الأخرى أكبر مسافة ممكنة وتكون النتيجة هى الانفراج الذى نشاهده . وحيث أن المعدن يستند على زجاج أو أى عازل آخر ، فإن المائع يبق على الموصل زمناً يطول أو يقصر على حسب — ما تسمح به درجة توصيل الهواء . نفهم الآن لماذا يتحتم لمس المعدن قبل البدء فى التجربة . فى هذه الحالة يكون المعدن وجسم الإنسان والأرض موصلاً واحداً هائلاً ، وينتشر المائع الكهربائى على هذا الموصل الهائل ولا يبقى منه شىء يذكر على الالكتروسكوب .

٢ — تبدأ هذه التجربة مثل التجربة السابقة تماماً . ولكن المطاط لا لمس المعدن بل يقترب منه فقط . وحيث أن المائعين الموجودين فى المعدن يمكنها الحركة بحرية ، فإنهما يتفرقان ويجذب أحدهما بينما يطرد الآخر . ويمتزج المائعان مرة أخرى عندما يبعد قضيب المطاط وذلك لأن المائعين المختلفى النوع يجذب كل منهما الآخر .

٣ — في هذه التجربة تفصل المعدن إلى قسمين وبعد ذلك نبعد قضيب المطاط في هذه الحالة يتعذر على المائمين أن يمتزجا وعلى ذلك تحتفظ ورقتا الذهب بزيادة من أحد المائعين وتبقيان منفرجتين .

تبدو جميع الحقائق التي ذكرناها فيما سبق مفهومة في ضوء هذه النظرية البسيطة . وتقوم هذه النظرية بأكثر من ذلك ، ففضلا عن الحقائق السابقة ، تمكننا النظرية من فهم حقائق أخرى كثيرة عن الكهرباء الساكنة . الفرض من أية نظرية جديدة هو أن تؤدي إلى اكتشاف ظواهر وقوانين جديدة ، ويتضح ذلك بمثال كالآتي : تصور تغييراً في التجربة الثانية . افرض أن قضيب المطاط يبقى قريباً من المعدن وانك في نفس الوقت تلمس الموصل باصبعك ، ماذا يحدث الآن ؟ وتجب النظرية على ذلك بأنه يمكن للمائع المطرود (—) أن يهرب عن طريق جسمك وتكون النتيجة أن يبقى مائع واحد هو المائع الموجب . وأوراق



الالكتروسكوب القريبة من قضيب المطاط هي التي تبقى منفرجة ويمكن التحقق من ذلك بتجربة فعلية .

إذا نظرنا إلى هذه النظرية بمنظار علم الطبيعة الحديث، فمن المؤكد أننا سنجد لها بسيطة بدائية وغير مرضية . وبالرغم من ذلك فهي مثال جيد يبين الخواص التي تميز كل نظرية طبيعية . ولا توجد نظريات دائمة في العلم فبعض الحقائق التي تنبأ بها نظرية ما كثيراً ما يثبت عدم صحتها بالتجربة . ولكل نظرية فترة معينة تنمو فيها تدريجياً وتزدهر ، وقد تتداعى بعد ذلك بسرعة . ونشأة وسقوط نظرية السيل

للحرارة هو أحد الأمثلة الكثيرة على ذلك . وسندرس أمثلة أخرى أكثر أهمية وعمقاً فيما بعد .

ويكاد ينشأ كل تقدم علمي عظيم من أزمة في النظرية القديمة وذلك نتيجة للبحث عن مخرج من الصعوبات الموجودة . يجب أن نختبر المبادئ والنظريات القديمة رغم أنها تنتسب إلى الماضي ، لأن هذا هو الطريق الوحيد لفهم أهمية ومدى صحة المبادئ والنظريات الجديدة .

في الصفحات الأولى من هذا الكتاب ، قارنا الدور الذي يقوم به الباحث بعمل المخبر البوليسي الذي يجد الحل الصحيح بالتفكير والبحث بعد أن يجمع الحقائق الضرورية . ولكن هذا التشبيه سطحي فقط ولا أساس له . ففي كل من الحياة الواقعية ، والقصص البوليسية تكون الجريمة معروفة . وعلى المخبر البوليسي أن يبحث عن خطابات وبصمات أصابع ورصاص ومسدسات .. ولكنه يعلم تماماً أن جريمة قد ارتكبت . أما حالة العالم فليست كذلك ، وليس من الصعب أن نتخيل شخصاً لا يعلم شيئاً على الإطلاق عن الكهرباء ، فقد عاش أجدادنا حياتهم دون أن يعلموها شيئاً . لنفرض الآن أن في حوزة هذا الشخص معدن وقصيب من المطاط وقطعة من قماش الفانلة وورقتان من الذهب وزجاجات .. وبالاختصار كل ما يحتاجه لإجراء التجارب الثلاث السابقة ، بالرغم من أن هذا الشخص ذو ثقافة عالية فإنه في الغالب سيستمعل الزجاجات في حفظ الخمر ، وقماش الفانلة في التنظيف ولن يفكر مطلقاً في عمل الأشياء التي وصفناها . أما في حالة المخبر البوليسي فالجريمة معروفة ، أي أن المسألة مصاغة ! من الذي قتل محمد حسن ؟ ويجب على العالم نفسه أن يرتكب الجريمة إلى حد ما ، وأن يقوم بالبحث أيضاً ، وزيادة على ذلك فإن مهمته ليست مقصورة على تفسير حالة واحدة معينة بل هي تفسير جميع الظواهر التي حدثت والتي قد تحدث فيما بعد .

في المقدمة التي أعطيناها لتوضيح فكرة المائمين ؛ نرى بوضوح تأثير الفكرة الميكانيكية التي تحاول تفسير كل ظاهرة بدلالة المادة وبدلالة القوى البسيطة التي تعمل بينها ، وإذا أردنا أن نبين ما إذا كان من الممكن تطبيق وجهة النظر

الميكانيكية لوصف الظواهر الكهربائية ، فإنه يتحتم علينا دراسة المسألة الآتية :
نفرض أن لدينا كرتين صغيرتين على كل منهما شحنة كهربائية ، أى أن على كل
منهما زيادة معينة من أحد المائعين . نعلم أن الكرتين إما أن تتجاذبا أو تتنافرا .
ولكن هل تتوقف القوة المؤثرة على البعد فقط ؟ وإذا كان الأمر كذلك فما هى
العلاقة بين القوة والبعد ؟ يبدو أن أبسط تخمين ممكن هو أن العلاقة بين القوة
بين القوة والبعد فى هذه الحالة هى نفس العلاقة بينهما فى حالة قوة الجاذبية التى
فيها على سبيل المثال تنقص القوة إلى تسع قيمتها إذا ازداد البعد إلى ثلاثة أمثاله .
لقد أثبت كولوم صحة هذا القانون بالتجارب التى أجراها . فبعد مائة عام من
اكتشاف نيوتن لقانون الجاذبية وجد كولوم قانوناً مشابهاً يربط بين القوة
الكهربائية والبعد ، ونقطتا الاختلاف الرئيسيتان بين قانونى نيوتن وكولوم هما :
(١) توجد قوى الجاذبية باستمرار بينهما لا توجد القوى الكهربائية إلا إذا
كان الجسمان مشحونين بالكهرباء .

(٢) فى حالة الجاذبية توجد قوة جاذبة فقط ولكن القوة الكهربائية قد
تكون جاذبية أو طاردة .

ينشأ هنا نفس السؤال الذى درسناه فى حالة الحرارة : هل للمائعين الكهربائيين
وزن أم لا ؟ أو بعبارة أخرى هل وزن قطعة معدنية وهى فى حالة التعادل يساوى
ووزنها وهى مشحونة بالكهرباء ؟ بواسطة الموازين الموجودة لدينا لا تبين أى
فرق فى الوزن فى هاتين الحالتين . وعلى ذلك نستنتج أن المائعين الكهربائيين
سيالان لا وزن لهما .

يستلزم التقدم فى دراسة نظرية الكهرباء إدخال فكرتين جديدتين . ومرة
أخرى سنتحاشى التعاريف المضبوطة ، مستخدمين بدلا منها طريقة المقارنة بالمبادئ
التي نعرفها جيداً . ونحن نذكر أهمية التمييز بين كمية الحرارة ودرجاتها فى دراسة
ظاهرة الحرارة . يعادل ذلك فى الأهمية ، التمييز بين الجهد الكهربائى والشحنة
الكهربائية . ويتضح الفرق بين هاتين الفكرتين من التناظر الآتى :

درجة الحرارة

الحرارة

الجهد الكهربائى

الشحنة الكهربائية

فقد يحتوى موصلان ، كرتان مختلفتا الحجم مثلاً ، على شحنتين كهربائيتين متساويتين (أى على زيادة متساوية من أحد المائعين) ولكن جهدهما يختلف ويكون جهد الكرة الصغرى أعلى من جهد الكبرى . ستكون الكثافة السطحية للمائع على الكرة الصغرى أكبر منها على الكرة الكبرى . وحيث أن القوة الطاردة لا بد وأن تزداد بازدياد الكثافة ، فإن الدرجة التى تميل بها الشحنة إلى الهروب تكون أكبر فى حالة الكرة الصغرى منها فى حالة الكرة الكبرى . ويدل ميل الشحنة إلى ترك الموصل على جهد هذا الموصل ، ولكي نبين بوضوح الفرق بين الشحنة والجهد سنصوغ بعض العبارات التى تصف خواص الأجسام الساخنة والعبارات المناظرة فى حالة الموصلات المشحونة بالكهرباء .

الحرارة

إذا تلامس جسمان وكانت درجتا حرارتهما مختلفتين قبل التلامس فإنهما يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد فترة من الزمن .

إذا كان لدينا جسمان مختلفان فى السعة الحرارية وأعطينا كلا منهما مقداراً متساوياً من الحرارة فإن التغير فى درجتى حرارتهما يكون مختلفاً .

إذا لامس ترمومتر جسماً ، فإنه يبين بواسطة طول عموده الزئبقى درجة حرارة الترمومتر وبالتالى درجة حرارة الجسم .

الكهرباء

إذا تلامس موصلان وكان جهدهما قبل التلامس مختلفين فإنهما يصلان إلى نفس الجهد بعد فترة زمنية قصيرة جداً .

إذا كان لدينا جسمان مختلفان فى السعة الكهربائية وأعطينا كلا منهما شحنة كهربائية متساوية فإن التغير فى جهديهما يكون مختلفاً .

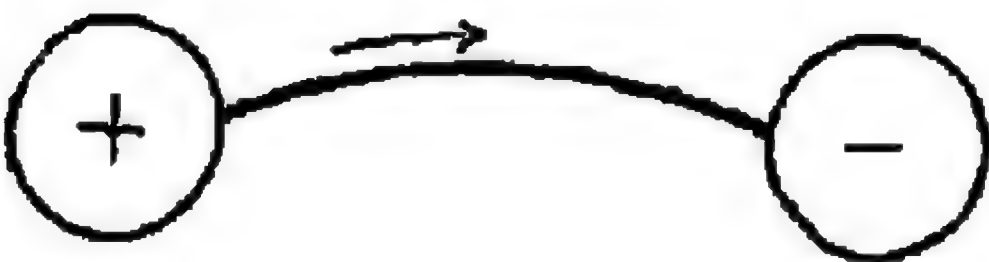
إذا اتصل الكترولسكوب بموصل فإنه يبين بواسطة انفراسج ورقتيه الذهبيتين جهد نفسه الكهربائى وبالتالى الجهد الكهربائى للموصل .

ولكن يجب ألا نذهب بعيداً فى هذا التناظر . والمثال الآتى يبين وجود أوجه اختلاف وأوجه تشابه بين الحرارة والكهرباء . إذا لامس جسم ساخن

جسماً بارداً فإن الحرارة تسرى من الجسم الساخن إلى الجسم البارد . نفرض أن لدينا موصلين معزولين على كل منهما شحنة متساوية الأولى موجبة والثانية سالبة . جهدا الموصلين مختلفان . حسب ما اتفق عليه ، يكون جهد الموصل ذى الشحنة الموجبة أعلى من جهد الموصل ذى الشحنة السالبة . ولكن إذا وصل الموصلان بسلك فحسب نظرية المائعين الكهربائيين تتلاشى شحنة كليهما ، وعلى ذلك لا يوجد فرق في الجهد الكهربائي على الإطلاق . يجب أن نتخيل « انسياب » الشحنة الكهربائية من أحد الموصلين إلى الآخر أثناء الفترة الزمنية القصيرة التي يتلاشى فيها فرق الجهد . ولكن كيف يكون ذلك ؟ هل ينساب المائع الموجب إلى الجسم السالب الشحنة ، أم المائع السالب إلى الجسم الموجب الشحنة .

المعلومات المذكورة هنا لا تمكننا من الجزم بأحد هذين الاحتمالين أو بأن الانسياب يحدث في الاتجاهين في نفس الوقت . والسؤال ليست إلا أمراً يتفق عليه ، ولا يوجد أى مغزى للاختيار لأنه لا توجد لدينا أية طريقة عملية للإجابة على هذا السؤال . وقد أجابت التطورات التالية ، التي أدت إلى نظرية أكثر تماسكا للكهرباء على هذا السؤال . وهذه الإجابة تبدو لا معنى لها على الإطلاق إذا صيغت بدلالة النظرية البسيطة الأولية ، أى نظرية المائعين الكهربائيين . وسنفترض هنا ما يأتى : ينساب المائع الكهربائي من الموصل ذو الجهد الأعلى إلى الموصل ذو الجهد الأدنى . وعلى ذلك ففي الحالة الخاصة التي تدرسها تسرى الكهرباء من الموجب إلى السالب . وهذا التعبير هو مسألة اتفاق فقط وحتى الآن هو اختيارى بحث .

وتبين هذه الصعوبة أن التناظر بين الحرارة والكهرباء ليس كاملاً بأي حال من الأحوال .
لقد رأينا إمكان تطبيق وجهة النظر

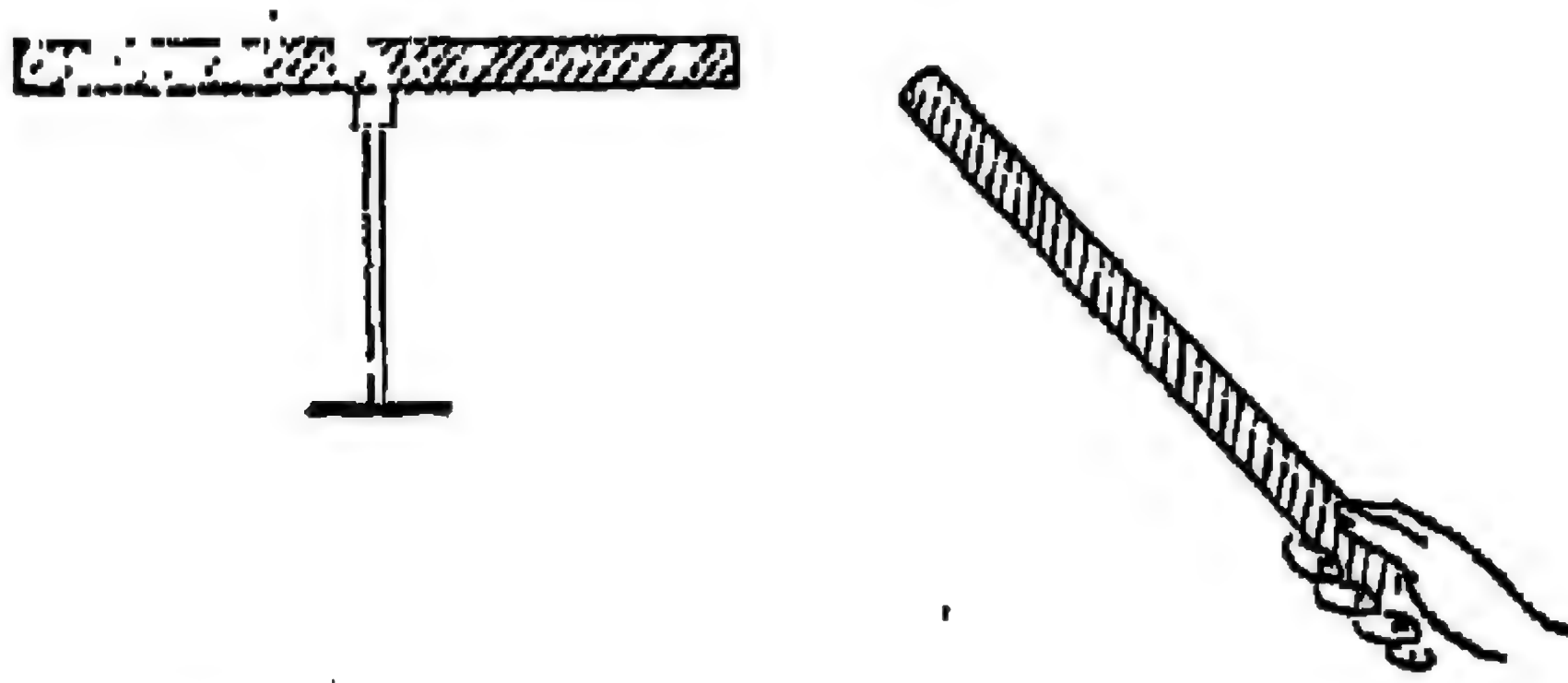


الميكانيكية لوصف الحقائق الأولية في الكهرباء الاستاتيكية . ونفس الشيء ممكن في حالة الظواهر المناطيسية .

المألفان المغناطيسان :

سنسير هنا بنفس الطريقة السابقة ، فنبداً بحقائق بسيطة للغاية ، ثم نبحث عن تفسيرها النظري .

١ - لدينا قضيبان مغناطيسان طويلان ، الأول يتحرك بسهولة في مستو أفق حول مركزه المثبت والآخر ممسوك باليد . نقرب طرفا القضيبين من بعضهما

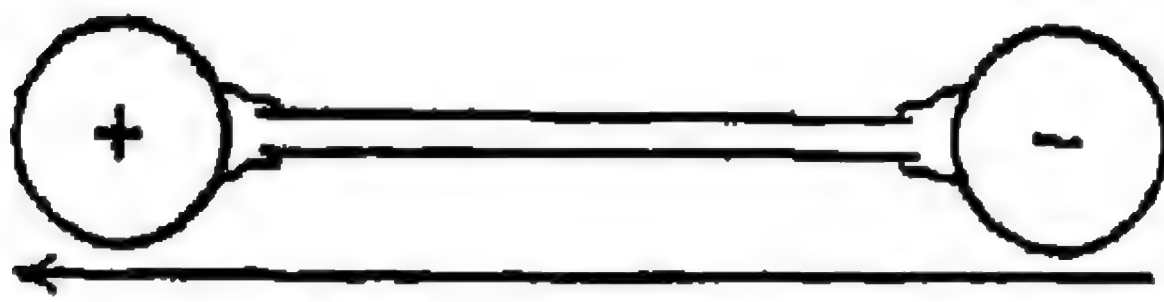


فنلاحظ قوة جاذبة شديدة بينهما . يمكن إجراء هذه التجربة دائماً . وإذا لم تلاحظ هذه القوة الجاذبية فحاول الطرف الآخر للقضيب الممسوك باليد ولا بد أن تلاحظ هذه الظاهرة السابقة إذا كان القضيبان ممغنطين . تسمى نهايتا القضيب قطبيه . لإكمال التجربة السابقة نحرك قضيب المغناطيس الممسوك باليد على المغناطيس الآخر . نلاحظ أن قوة الجذب تتناقص إلى أن يصل القضيب إلى منتصف هذا المغناطيس الأخير فلا نشعر بأية قوة جاذبة على الإطلاق . وإذا تحرك القضيب في نفس الاتجاه فإننا نشعر بقوة طاردة تصل إلى نهايتها العظمى عند القطب الثاني للمغناطيس الأفق .

٢ - تؤدي التجربة السابقة إلى تجربة أخرى . كل مغناطيس له قطبان . هل يمكن عزل أحدهما ؟ الفكرة في غاية البساطة ، يكفي أن نكسر المغناطيس إلى جزئين متساويين . لقد رأينا أنه لا توجد قوة بين قطب المغناطيس الأول ومركز الثاني . ولكن النتيجة التي تحصل عليها من كسر المغناطيس غريبة وغير متوقعة . وإذا كررنا التجربة الأولى على أحد نصفي المغناطيس نحصل على نفس

النتائج السابقة ! يوجد الآن قطب قوى فى الموضع الذى لم نلاحظ وجود أية قوة مغناطيسية عنده أولاً .

كيف تفسر هذه الحقائق ؟ يمكننا أن نحاول وضع نظرية للمغناطيسية مشابهة لنظرية الكهرباء السابقة . وذلك لأن قوى الجذب والطرْد تصاحب كلا من الظواهر المغناطيسية والكهربائية . نفرض أن لدينا موصلين كربين عليهما شحنتين كهربائيتين متساويتين فى القيمة المطلقة إحداهما موجبة والأخرى سالبة ، $+e$ ، $-e$ مثلاً . نفرض أيضاً أن قضيباً عازلاً من الزجاج مثلاً ، يصل بين هاتين الكرتين . يمكن تمثيل هذه المجموعة

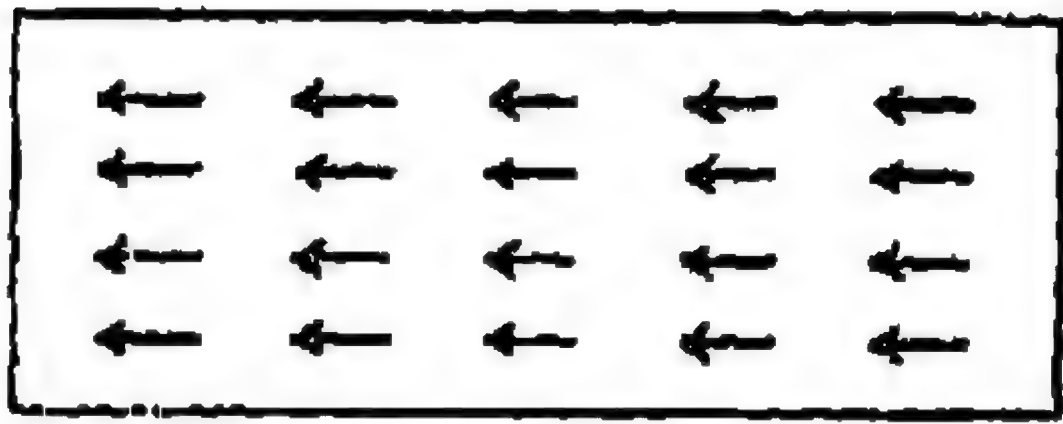


بهم متجه من الموصل ذو الشحنة السالبة إلى الموصل ذو الشحنة

الموجبة . تسمى هذه المجموعة مزدوجاً كهربائياً . من الواضح أن مزدوجين كهربائيين من هذا النوع يسلكان نفس سلوك القسبين المغناطيسين فى التجربة الأولى . وإذا نظرنا إلى هذه المجموعة على أنها تمثل مغناطيسياً حقيقياً فمن الممكن أن نقول (على فرض وجود المائعين المغناطيسيين) أن المغناطيس ماهو إلا مزدوج مغناطيسى له عند نهايتاه مائعان مغناطيسيان مختلفى النوع .

نستطيع بهذه النظرية البسيطة ، التى حصلنا عليها بتقليد نظرية الكهرباء ، أن نفسر نتائج التجربة الأولى نحصل من هذا التمثيل على قوة جاذبة عند أحد الطرفين وطاردة عن الآخر وعلى قوتين متساويتين ومتعادلتين عند الوسط . ولكن هل نستطيع تفسير نتائج التجربة الثانية أيضاً ؟ بكسر قضيب الزجاج (فى حالة المزدوج الكهربائى) نحصل على قطبين منعزلين . حسب النظرية الجديدة يجب أن نحصل على نفس النتيجة إذا كسرنا المغناطيس . ولكن النتائج التى حصلنا عليها من التجربة الثانية تخالف ذلك . يحتم علينا هذا التناقض أن نبحث عن نظرية أفضل . بدلاً من النموذج السابق ، نتخيل أن المغناطيس مكون من مزدوجات مغناطيسية صغيرة جداً ولا يمكن تفرقة قطبي أى واحد منها بالكسر ، واتجاه جميع هذه المزدوجات واحد هو اتجاه المغناطيس . يتضح على الفور لماذا يسبب كسر

المغناطيس ظهور قطبين جديدين كما نرى أن هذه النظرية الجديدة توضح حقائق تجربتي ٢٦١ .



وتكفي النظرية الأولى ، دون إدخال أى تعديل عليها ، لتفسير كثير من الحقائق .
فمثلا نعلم أن المغناطيس يجذب قطع الحديد ؟

لماذا ؟ في قطعة الحديد العادية يكون المائعان المغناطيسيان ممتزجين وعلى ذلك لا يكون لها أى تأثير مغناطيسى ، وتقريب قطب موجب من قطعة الحديد يكون بمثابة « أمر بالتفريق » للمائعين ، فيجذب القطب الموجب مائع الحديد السالب ويطرد الموجب . وينتج عن ذلك قوة الجذب بين المغناطيس والحديد . وإذا أبعدنا المغناطيس يعود المائعان إلى حالة تقرب من حالتهم الأولى ، وتعتمد درجة اختلاف الحالتين على الدرجة التى يتذكر بها المائعان الصوت الأمر للقوة الخارجية أى على درجة تأثيرهم بالمغناطيس .

ولن نتحدث إلا قليلا عن الجانب الكمي للموضوع . إذا كان لدينا قضيبان ممغنطان طويلان فإنه يمكننا بحث تجاذب (أو تنافر) قطبيهما عندما يقترب أحدهما من الآخر . وإذا كان القضيبان طويلين بدرجة كافية ، فإن تأثير القطبين البعيدين على بعضهما يكون صغيراً ويمكن إهماله . ماهى العلاقة بين قوة تجاذب أو تنافر القطبين وبين البعد بينهما ؟ لقد أجابت تجربة كولوم على هذا السؤال كما يأتى :
هذه العلاقة هى كما فى قانون الجاذبية لنيوتن وقانون كولوم للكهرباء الاستاتيكية .

نرى مرة أخرى فى هذه النظرية تطبيقاً لوجهة نظر عامة ، ألا وهى : الميل إلى وصف جميع الظواهر بدلالة قوى جاذبة وطاردة تتوقف فقط على البعد بين جسيمات ثابتة لا تتغير وتتأثر بينها .

وسنشير الآن إلى حقيقة ، معروفة تماماً ، وذلك لأننا سنستعملها فيما بعد . وهى أن الأرض هى مزدوج مغناطيسى كبير . ولا يوجد أى شئ يفسر هذه الحقيقة . ويكاد

يتطبق قطبا الأرض الشمالى والجنوبى على قطبيها المغناطيسيين السالب والموجب على الترتيب . وطبعاً ، ليست الأسماء سالب وموجب إلا مسألة اتفاق . ولكن هذه التسمية بعد الاتفاق عليها تمكنا من التمييز بين الأقطاب فى أية حالة أخرى . والابرة المغناطيسية التى تتحرك فى مستواقى حول منتصفها تطيع أمر القوة المغناطيسية الأرضية . قطبها الموجب يشير نحو قطب الأرض الشمالى أى قطبها المغناطيسى السالب . ورغم أنه يمكننا تطبيق وجهة النظر الميكانيكية باستمرار للظواهر المغناطيسية والكهربائية التى أشرنا إليها هنا فإنه لا يوجد ما يدعو إلى الفخر أو السرور لذلك فمن المؤكد أن بعض نواحي النظرية غير مرضيه إن لم تكن غير مشجعة . فمن الضرورى للنظرية إيجاد أجسام سيالة جديدة هى المائعات الكهربائية والمزدوجات المغناطيسية الأولية . لقد ازداد عدد الأجسام السيالة كثيراً ! .

والقوى التى ظهرت بسيطة ، ويمكن التعبير عن القوى المغناطيسية والكهربائية وقوى الجاذبية بنفس الطريقة . ولكننا ندفع ثمناً غالياً لهذه البساطة ألا وهو إدخال الأشياء السيالة الجديدة والعديمة الوزن . وليست هذه سوى صور مفتعلة وغير حقيقية ولا علاقة بينها وبين الأجسام الأصلية وهى المادة .

الصعوبة الجديدة الأولى :

نحن الآن فى حالة تسمح بذكر الصعوبة الجديدة الأولى التى نشأت عن تطبيق وجهة نظرنا الفلسفية العامة . وسنثبت فيما بعد أن هذه الصعوبة وأخرى أشد منها هما السبب فى تداعى الاعتقاد بإمكان تفسير جميع الظواهر ميكانيكياً .

لقد بدأ التطور العظيم فى الكهرباء كفرع من فروع العلم والهندسة ، باكتشاف التيار الكهربائى . ونجد هنا إحدى اللحظات القلائل فى تاريخ العلم التى تلعب فيها الصدفة دوراً هاماً . وتروى قصة قوة ساق الضفدعة بطرق مختلفة . وبنفس النظر عن التفاصيل ، لا يوجد أى شك فى أن اكتشاف جلفانى الذى حدث بالصدفة ، قاد قولنا إلى تصميم ما يعرف ببطارية (عمود) فولتا . ولا توجد لهذه البطارية أية فائدة عملية الآن ولكنها لا تزال تعطى مثالا بسيطاً لمصدر تيار كهربائى فى التجارب

المدرسية وفي الكتب الدراسية . وفكرة تركيب هذه البطارية بسيطة ، توجد عدة مخبرات تحتوي على ماء مضاف إليه قليل من حامض الكبريتيك وفي كل مخبر توجد قطعتان معدنيتان الأولى من النحاس والثانية من الزنك مغمومتان في المحلول ويتصل لوح النحاس في كل إناء بلوح الزنك في الإناء التالي ؛ أى أن لوح الزنك في الإناء الأول ولوح النحاس في الإناء الأخير هما اللوحان الوحيدان غير المتصلان . يمكننا أن نستدل على وجود فرق في الجهد الكهربائي بين نحاس الإناء الأول وزنك الإناء الأخير (وذلك باستخدام الكتروسكوب متوسط الحساسية) إذا كان عدد مكونات البطارية ، أى الأوعية التي يحتوي كل منها على لوح الزنك والنحاس ، كبيراً بدرجة كافية .

لا تتميز بطارية فولتا المكونة من عدة عناصر عن أخرى مكونة من عنصر واحد إلا في سهولة قياس الكميات المتعلقة بها وهذا هو السبب الوحيد الذي من أجله تكلمنا عن بطارية ذات عناصر كثيرة ، أما فيما يلي فعنصر واحد يكفي تماماً . وجهد النحاس أعلى من جهد الزنك . واستعمال كلمة أعلى هنا يناظر استعمالها عندنا نقول أن $+ ٢$ أعلى (أكبر) من $- ٢$. إذا اتصل موصل بلوح النحاس وآخر بالزنك فإن كلا من الموصلين يصبح مشحوناً ؛ وتكون شحنة الأول موجبة وشحنة الثانى سالبة . حتى هذه النقطة لم يظهر بعد أى شيء جديد يستحق الملاحظة تقريباً ، ويمكننا محاولة تطبيق أفكارنا السابقة عن فرق الجهد . ولقد رأينا أن الفرق في الجهد بين أى موصلين يتلاشى إذا وصلنا بينهما بسلك ، إذ بذلك ينساب مائع كهربائي من أحد الموصلين إلى الآخر . وكانت هذه العملية تشابة عملية تساوى درجتى الحرارة نتيجة لانسياب الحرارة . ولكن هل نحصل على نفس النتيجة في حالة بطارية فولتا ؟ لقد كتب فولتا في تقريره يقول أن اللوحين كانت بهما نفس صفات الموصلات .

« ضعيفا الشحنة يعملان بدون توقف أو أن شحنتهما ترجع إلى قيمتها الأولى بعد كل تفريغ كهربائي أو بمعنى آخر ينتج عن هذا شحنة غير منتية أو فعلا دائما ينتج - عنه المائع الكهربائي » .

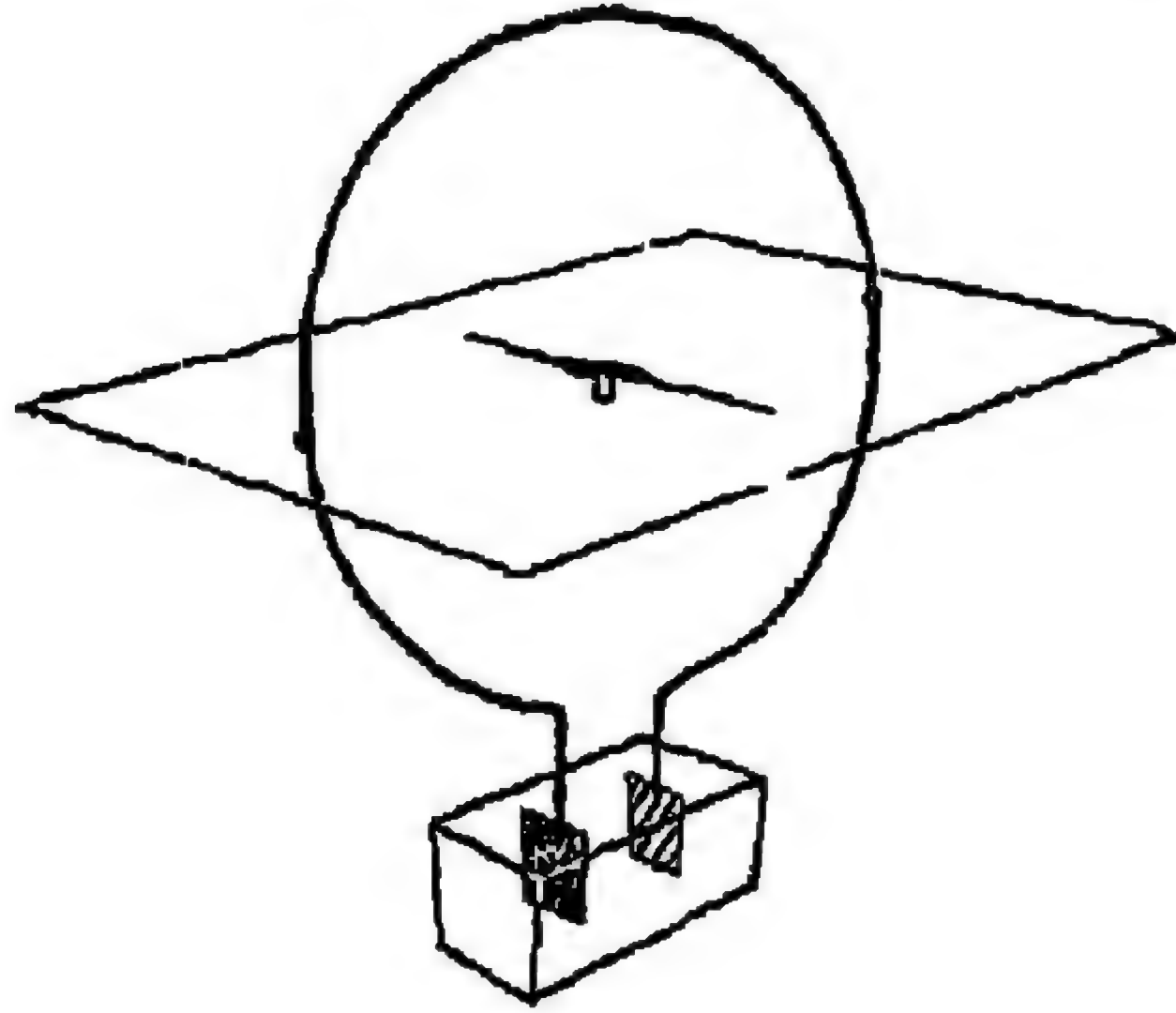
والنتيجة الغريبة لهذه التجربة أن فرق الجهد بين لوحى النحاس والزنك لا يتلاشى كما فى حالة موصلين مشحونين ومتصلين بسلك بل يوجد فرق الجهد باستمرار وحسب نظرية الموائع الكهربائية ، لا بد وأن يسبب هذا الفرق فى الجهد إنسياباً مستمراً للمائع الكهربائى من الموصل ذو الجهد العالى (لوح النحاس) إلى الموصل ذو الجهد الأدنى (لوح الزنك) . لكي نحافظ على نظرية الموائع الكهربائية من الانهيار فنفترض وجود قوة ما ثابتة تؤثر فتوجد فرق الجهد وتسبب انسياب المائع الكهربائى . ولكن الظاهرة كلها مدهشة من ناحية الطاقة إذ تتولد كمية ملحوظة من الحرارة فى السلك الذى يحمل التيار لدرجة أن هذا السلك ينصهر إذا كان رقيقاً . وعلى ذلك تتولد طاقة حرارية فى السلك . ولكن بطارية فولتا كلها تكون مجموعة مقفلة وذلك لعدم وجود أى مصدر خارجى للطاقة وإذا أردنا أن نحفظ قانون بقاء الطاقة من التداعى ، يجب علينا أن نبحت أين يحدث التحويل وعلى حساب ماذا تتولد الحرارة . لا يصعب التحقق من وجود عمليات كيميائية معقدة فى البطارية ، والمواد التى تتفاعل فى هذه العمليات هى الزنك والنحاس والسائل المغموسين فيه . وهذه هى الكيفية التى تتحول بها الطاقة : طاقة كيميائية ← طاقة المائع المناسب أى التيار الكهربائى ← حرارة . ونتيجة للتغيرات الكيميائية التى تصاحب انسياب الكهرباء تصبح بطارية فولتا غير صالحة للاستعمال بمضى الوقت .

والتجربة التى كشفت فعلاً عن الصعوبات الكبرى فى تطبيق الأفكار الميكانيكية لا بد وأن تبدو غريبة على أى شخص يسمع عنها للمرة الأولى . وقد أجرى أورستن هذه التجربة منذ مائة وعشرون عاماً ، وجاء فى تقريره ما يأتى :

يمكن البرهنة بهذه التجارب على أن الإبرة المغناطيسية تحرك نتيجة لجهاز جلفانى ، وذلك عند ما أقفلت الدائرة الجلفانية وليس عند فتحها ، كما حاول بعض علماء الطبيعة الأفذاذ دون جدوى منذ عدة سنين مضت .

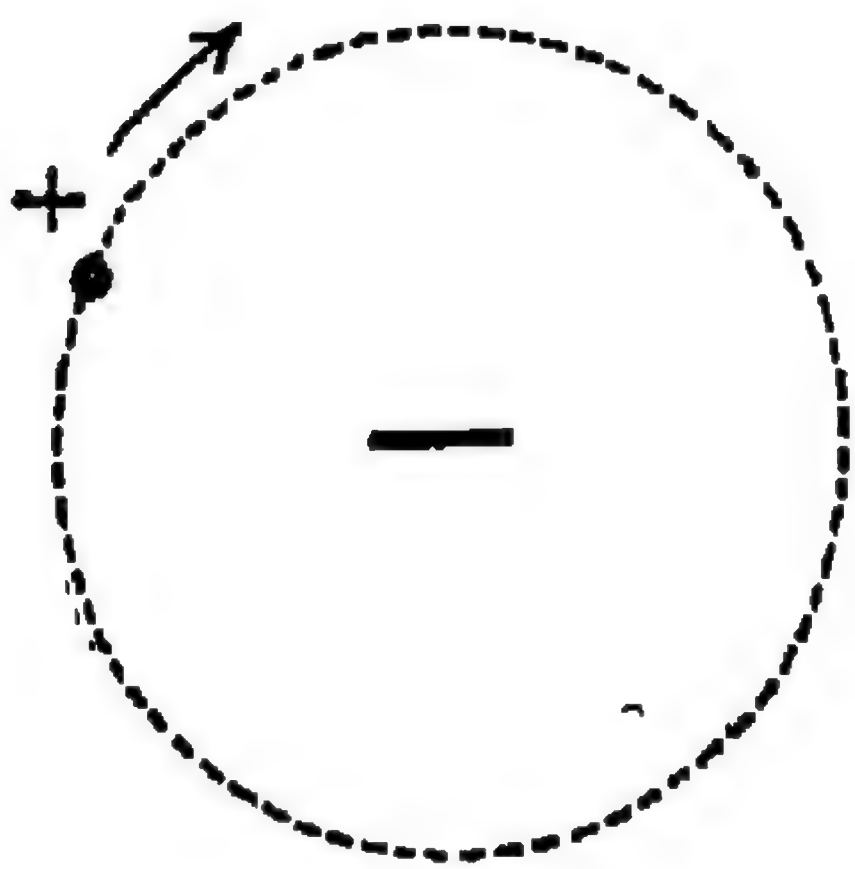
نفرض أن لدينا بطارية فولتا وسلك موصل . إذا وصلنا السلك إلى لوح النحاس فقط فإنه يوجد فرق فى الجهد ولكن لا يوجد تيار . نفرض أن السلك ثنى بحيث

يكون دائرة وأنه توجد إبرة مغناطيسية عند مركز السلك وفي مستوييه . لا يحدث أى شيء مادام السلك لا يمس لوح الزنك . لا توجد أية قوة مؤثرة ، أى أن فرق الجهد ليس له أى تأثير على وضع الإبرة . أن من الصعب فهم لماذا توقع بعض « علماء الطبيعة الافذاذ » . كما سماهم أورستد ، مثل هذا التأثير .



لنصل السلك الآن بلوح الزنك ، يحدث شيء غريب على الفور . تدور الإبرة المغناطيسية وتأخذ وضعاً مخالفاً لوضعها الأول . وإذا كان هذا الكتاب هو مستوى السلك فإن أحد قطبي الإبرة يشير الآن إلى القارىء . والذي نلاحظه هو تأثير قوة على القطب المغناطيسى . وتؤثر هذه القوة في اتجاه عمودى على الدائرة . وبعدمواجهة حقائق هذه التجربة يصعب أن نتحاشى استنتاج اتجاه القوة المؤثرة . هذه التجربة جديرة بالاهتمام لأنها تبين العلاقة بين ظاهرتين مختلفتين هما المغناطيسية والتيار الكهربائى . ويوجد سبب آخر أقوى لأهمية هذه التجربة . لا يمكن أن تقع القوة التى تعمل بين القطب المغناطيسى والأجزاء الصغيرة للسلك الذى يمر فيه التيار على الخطوط الواصلة بين الإبرة والسلك ، أى لا يمكن أن تكون خطوط عمل القوة هى الخطوط الواصلة بين المزدوجات المغناطيسية الأولية وبين جسيمات التيار المنساب . فالقوة عمودية على هذه الخطوط ! ولأول مرة تظهر قوة تختلف تماماً عن القوى التى قصدنا ، من وجهة النظر الميكانيكية ، أن ننسب إليها جميع الأحداث فى العالم الخارجى . ونحن نذكر أن قوة الجاذبية والقوى المغناطيسية والكهربائية تتبع قانونى نيوتن وكولوم وتؤثر فى المستقيم الواصل بين الجسمين المتجاذبين (أو المتنافرين) .

وقد زادت هذه الصعوبة وضوحاً بتجربة أجراها رولاند بمهارة منذ ستين عاماً . وإذا تركنا التفاصيل الفنية جانباً فإنه يمكن وصف هذه التجربة كما يلي : تخيل كرة صغيرة مشحونة بالكهرباء . تخيل أيضاً أن هذه الكرة تتحرك بسرعة كبيرة في دائرة يوجد عند مركزها إبرة مغناطيسية . أساس هذه التجربة هو نفس أساس تجربة أورستد والفرق الوحيد هو أننا نستعويض عن التيار بحركة ميكانيكية للشحنة الكهربائية . وجد رولاند أن النتيجة تشابه النتيجة التي نحصل عليها عندما يمر تيار في سلك دائري أى أن المغناطيس ينحرف بتأثير قوة عمودية . لنفرض الآن أن الشحنة تتحرك بسرعة أكبر . نتيجة لذلك تزداد القوة التي تؤثر على القطب المغناطيس وبذلك يزداد الانحراف عن الوضع الأصلي . تبين هذه النتيجة صعوبة أخرى . ففضلاً عن أن القوة لا تؤثر في الخط الواصل بين



الشحنة والمغناطيس فإن شدتها تتوقف على سرعة الشحنة . لقد بنيت وجهة النظر الميكانيكية جميعها على الاعتقاد بأن جميع الظواهر يمكن تفسيرها بدلالة قوى تتوقف على البعد فقط وليس على السرعة . ومن المؤكد أن نتيجة تجربة رولاند تزعم هذا الاعتقاد .

ومع ذلك فربما نكون من المحافظين ونحاول أن نبحث عن حل لا يتعارض مع المبادئ السابقة .

كثيراً ما تنشأ في العلم صعوبات مفاجئة وغير منتظرة مثل الصعوبات السابقة ، وهي تضع بذلك عقبات في طريق التطور الناجح لنظرية ما . وفي بعض الأحيان يبدو أن إدخال تعميم بسيط على الأفكار القديمة قد يخلصنا من هذه الصعوبات ولو بصفة مؤقتة . فثلاً قد يبدو في الحالة الحاضرة أن تدخل قوى أخرى عامة تؤثر على الجسيمات الصغيرة . ومع ذلك فكثيراً ما يصعب ترقيع نظرية قديمة ، وتؤدي الصعوبات إلى القضاء على النظرية القديمة ونشأة أخرى جديدة . ولم يكن سلوك الأبرة المغناطيسية هو العامل الوحيد في سقوط النظريات الميكانيكية التي

(م — هـ علم الطبيعة)

كانت تبدو ناجحة وذات أساس متين . فقد ظهر هجوم شديد آخر من ناحية أخرى مختلفة تماماً . ولكن هذه قصة أخرى سنتقصها فيما بعد .

سرعة الضوء :

في كتاب «علمان جديان» لجاليليو ، محادثة بين الأستاذ وتلاميذه موضوعها سرعة الضوء :

ساجريدو : ولكن ماهو نوع سرعة الضوء هذه وبأية درجة هي كبيرة ، هل هي آنية أم لحظية أم تحتاج إلى وقت مثل أية حركة أخرى ؟ وهل يمكن تحديد الاجابة على هذه الأسئلة بالتجربة ؟

سيمبليكو : تبين جميع المشاهدات اليومية في الحياة العملية أن انتشار الضوء آنى ، وذلك لأننا نرى لهب قذيفة المدفع على بعد كبير دون مضي أى وقت ولكن دويها لا يصل إلى الأذن إلا بعد فترة زمنية ملحوظة .

ساجريدو : حسناً يامبليكو . النتيجة الوحيدة التى يمكننى استنتاجها من هذه التجربة المألوفة هي أن صوت القذيفة يصل إلى الأذن بسرعة أصغر من التى يصل بها الضوء إلى العين ، ولكنها لاتبين ماذا كان وصول الضوء آنى أم أنه يحتاج إلى وقت رغم أنه سريع جداً ...

سالفانى : لقد قادتني النتائج البسيطة لهذه المشاهدات وما مائلها إلى تصميم طريقة يمكن بواسطتها التأكد مما إذا كانت آنية حقاً . . .

ويأخذ سالفانى فى شرح طريقة تجربته . ولكى تفهم فكرته سنفرض أن سرعة الضوء صغيرة فضلاً عن فرضنا أنها محدودة ، أى أننا سنفترض أن حركة الضوء قد أبطئت مثل حركة فلم سينمائي بطيء . رجلان أ ، ب يحمل كل منهما مصباح مغطى ويقفان على بعد ميل من بعضهما . يضئ الرجل الأول أ مصباحه . لقد اتفق الرجلان على أن يضئ ب مصباحه عند اللحظة التى يرى فيها ضوء مصباح أ . لنفرض فى « حركتنا البطيئة » أن الضوء يسير مسافة قدرها ميل فى الثانية الواحدة . يرسل أ اشارته برفع الغطاء عن مصباحه . يرى ب هذه الإشارة

بعد مرور ثانية واحدة ويجيبها برفع الغطاء عن مصباحه . ولا تصل إشارة ب إلى أ إلا بعد مرور ثانيتين من إعطائه (أى أ) إشارته . أى أنه إذا كان الضوء يسير بسرعة ميل فى الثانية فإنه يتحتم أن تمضى ثانيتان بين اللحظة التى يرسل فيها أ إشارته واللحظة التى يرى فيها إشارة ب ، على فرض أن ب يبعد عن أ مسافة قدرها ميل واحد . وبالعكس إذا كان أ يجهل سرعة الضوء ولكنه يفترض أن زميله قد حافظ على الاتفاق السابق وإذا رأى إشارة ب بعد ثانيتين من إرسال إشارته فإنه يستنتج أن الضوء يسير بسرعة ميل فى الثانية .

وكان احتمال استطاعة جاليليو تعيين سرعة الضوء بهذه الطريقة ضعيفاً جداً وذلك لسوء حالة الوسائل والأجهزة اللازمة للتجارب العملية فى ذلك الوقت . ولو كانت السافة ميلاً واحداً لوجب عليه أن يقيس فترات زمنية صغيرة مثل $\frac{1}{10}$ من الثانية !!

ولقد صاغ جاليليو مسألة تعيين سرعة الضوء ولكنه لم يحلها . وفى أغلب الأحيان تكون صياغة السؤال أهم من حله ، فقد لا يعتمد الحل إلا على مهارة رياضية أو تجريبية . وتحتاج صياغة الأسئلة الجديدة أو إثارة الاحتمالات الجديدة أو النظر إلى المسائل القديمة من وجهة نظر جديدة إلى خيال ممتاز وتفكير مبدع وهى تسجل تقدماً حقيقياً للعلم بالتفكير فى تجارب وظواهر معلومة تفكيراً جديداً والنظر إليها من وجهات أخرى حصلنا على قاعدة القصور الذاتى وقانون بقاء الطاقة . وسيجد القارئ فى الصفحات التالية أمثلة عديدة من هذا النوع حيث تبدو أهمية النظر فى الحقائق المعروفة من وجهة نظر جديدة وحيث بذلك تنشأ نظريات جديدة .

نعود الآن إلى المشكلة السهلة نسبياً ألا وهى تعيين سرعة الضوء . إن من الغريب حقاً أن جاليليو لم يدرك أن من الممكن أن يقوم رجل واحد بإجراء هذه التجربة بسهولة ودقة . فى استطاعة الرجل استعمال مرآة فى نفس المكان الذى يقف فيه زميله بدلا من هذا الزميل . فالمرآة تعيد الإشارة أوماتيكياً بمجرد وصولها .

وبعد حوالي مائتين وخمسين عاماً استعمل فيزو نفس هذه الفكرة ، وهو أول من عين سرعة الضوء بتجارب أجريت على سطح الكرة الأرضية . ولقد عين رومر سرعة الضوء قبل فيزو بكثير باستخدام مشاهدات فلسكية ، ولكن النتيجة التي حصل عليها فيزو أدق من التي حصل عليها رومر .

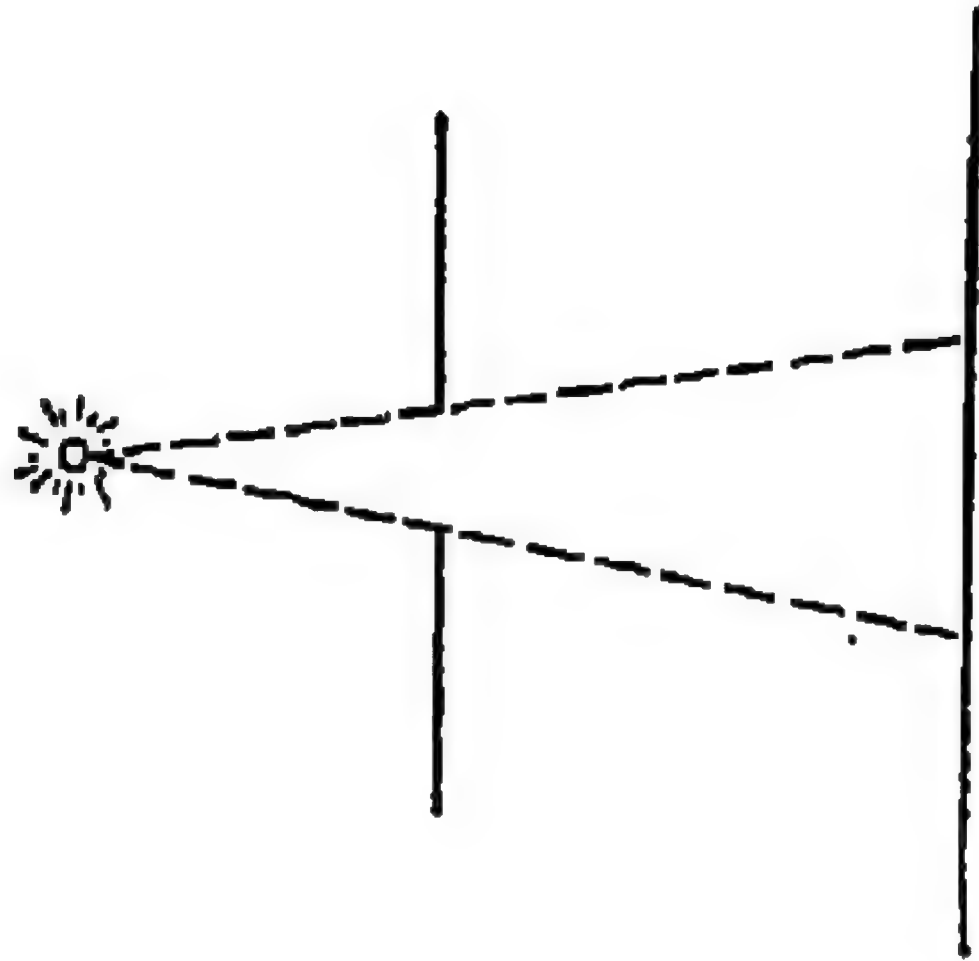
من الواضح أنه نتيجة لكبر سرعة الضوء الهائل ، تلزم لقياسها مسافات كبيرة يمكن مقارنتها بالبعد بين الأرض وأحد كواكب المجموعة الشمسية مثلاً ، أو باستعمال أجهزة علمية بعد تحسينها وزيادة درجة دقتها زيادة كبيرة . وقد استعمل رومر الطريقة الأولى وفيزو الطريقة الثانية . ولقد عين العدد الكبير الذي يمثل سرعة الضوء عدة مرات بعد هاتين التجربتين ، وكانت درجة الدقة تزداد كل مرة . وقد اخترع ميكلسون طريقة دقيقة للغاية لتعيين سرعة الضوء في القرن الحالي . ويمكن التعبير عن نتيجة هذه التجارب كما يأتي : سرعة الضوء في الفراغ تساوي :

١٨٦٠٠٠ ميل في الثانية تقريباً أو ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية .

النظرية الجسيمية للضوء :

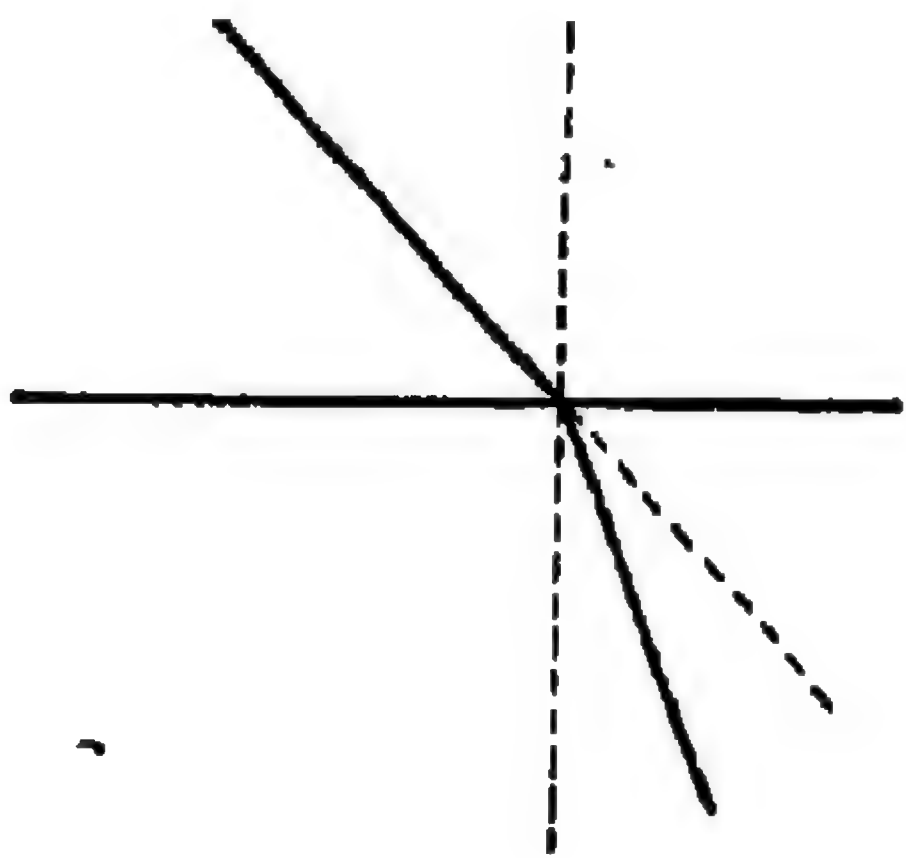
مرة أخرى نبدأ ببعض الحقائق العملية . العدد الذي أعطيناه فيما سبق هو سرعة الضوء في الفضاء الخيالي . إذا لم يقابل الضوء عقبات فإنه يسير في الفضاء الخالي بهذه السرعة . والملاحظ أننا نستطيع الرؤية خلال وعاء زجاجي مفرغ من الهواء كما يمكننا رؤية الكواكب والنجوم والسدم رغم أن الضوء يصل إلينا من هذه الأجسام مخترقاً الأثير . وإن إمكان الرؤية خلال وعاء زجاجي سواء أكان بها هواء أم لا ، ليعين أن وجود الهواء لا أثر له . ولهذا السبب يمكننا إجراء التجارب الضوئية في حجرة عادية كما لو كانت مفرغة من الهواء دون أن يؤثر ذلك في النتيجة . وإحدى الحقائق الضوئية البسيطة هي أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة . ومنصف تجربة أولية بسيطة توضح ذلك . توضع ستارة بها ثقب أمام نقطة ضوئية . والنقطة الضوئية هي مصدر ضوئي صغير جداً مثل فتحة صغيرة . في غطاء مصباح . وإذا كان هناك حائط على بعد من الستارة فإن الثقب الموجود

تفهمنا يظهر على الحائط كدائرة مضيئة وسط ظلام ، والرسم التالى يبين العلاقة بين هذه الظاهرة وبين سير الضوء فى خطوط مستقيمة . ويمكن بفرض أن الضوء يسير فى الفراغ أو فى الهواء فى خطوط مستقيمة تفسير جميع الظواهر المشابهة التى يظهر فيها الضوء والظل وأشباه الظلام .



لنعتبر الآن مثالا آخر وهو عند ما يسير الضوء خلال مادة . نفرض أن لدينا شعاعاً ضوئياً يتحرك فى الفراغ ويقابل سطحاً من الزجاج ولنتساءل ماذا يحدث فى هذه الحالة ؟ والجواب أنه إذا كانت قاعدة سير الضوء فى خطوط مستقيمة

صحيحة أيضاً فى هذه الحالة فإن مسار الشعاع يكون ممثلاً بالخط المتقطع وفى الواقع أن المسار ليس كذلك . يوجد انكسار فى المسار كما هو موضح فى الشكل ،

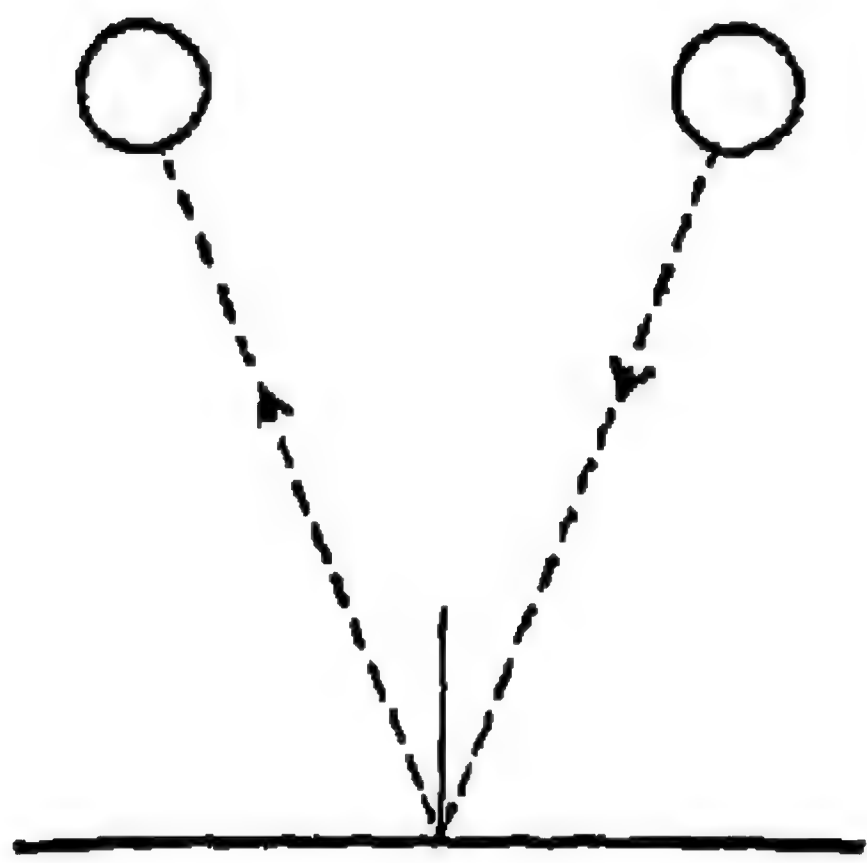


والذى تشاهده هو فى الواقع الظاهرة المسماة بالانكسار . إذا غمست عصاة فى ماء فإنها تظهر كأنها مثنية عند وسطها ، وليست هذه سوى إحدى صور الانكسار العديدة .

تبين هذه الحقائق أن فى الإمكان تكوين نظرية ميكانيكية بسيطة للضوء ،

وغرضنا هنا هو أن نبين كيف وجدت السميات « السيال والجسيمات والقوى » طريقها إلى مجال الضوء وكيف انهارت الفكرة الفلسفية القديمة فى النهاية . وتظهر النظرية هنا فى صورة بدائية بسيطة . لنفرض أن جميع الأجسام المضيئة تشع جسيمات تقابل العين فتولد إحساساً للضوء . ولقد تعودنا إذا لزم الأمر أن ندخل أنواعاً جديدة من المادة للحصول على تفسير ميكانيكى وعلى ذلك فإننا سنقوم بذلك هنا دون تردد . فى الفراغ الخالى لا بد وأن تتحرك هذه الجسيمات فى خطوط

مستقيمة بسرعة معلومة . وبذلك تصل إلى العين رسالة من الأجسام المشعة .
وجميع الظواهر التي تنتج عن سير الضوء في خطوط مستقيمة تؤيد نظرية الجسيمات ،
وذلك لأن هذا النوع من الحركة بالذات قد أدخل خصيصاً للجسيمات . والنظرية
تفسر أيضاً وبسهولة انعكاس الضوء على المرايا ، كما هو مشاهد في التجربة الميكانيكية
التي يلقي فيها بكرات مرنة على حائط والرسم التالي يوضح ذلك .



وتفسير ظاهرة الانكسار أصعب من ذلك
بقليل . وسنبين إمكان التفسير الميكانيكي دون
الدخول في التفاصيل . إذا سقطت الجسيمات على
سطح من الزجاج مثلاً فربما تؤثر عليها جزيئات
المادة بقوة تؤثر (مع غرابة ذلك) في الجوار المباشر
للمادة فقط . وكما نعلم ، كل قوة تؤثر على نقطة

متحركة تغير سرعتها . وإذا كانت القوة المحصلة التي تؤثر على جسيمات الضوء
هي قوة جاذبة عمودية على سطح الزجاج . فإن خط الحركة الجديد يكون واقعاً
بين خط الحركة الأول وبين العمودي على السطح . يبدو أن هذا التفسير يؤيد
نظرية الجسيمات للضوء . ومع ذلك فلتحديد فائدة هذه النظرية ومدى صحتها ،
يتحتم علينا أن ندرس حقائق جديدة أكثر تعقيداً .

لغز الألوان :

مرة أخرى كانت عبقرية نيوتن هي التي فسرت لأول مرة كثيرة الألوان
في السكون . وفيما يلي نقبس عن نيوتن وصفاً لإحدى تجاربه :

« في عام ١٦٦٦ (وهو الوقت الذي اشتغلت فيه بصقل زجاجات ضوئية ذات
سطح غير كرى) استعملت منشوراً ثلاثياً من الزجاج لدراسة ظاهرة الألوان
المشهورة . وقد أظلمت حجرتي وقت بعمل ثقب صغير في النافذة وذلك لأحصل
على كمية مناسبة من ضوء الشمس . وقد وضعت المنشور عند مصدر الضوء بحيث
ينكسر الضوء ويفصل إلى الحائط المقابل .

ولقد سررت لرؤية الضوء المنكسر الناتج ذى الألوان الزاهية القوية .

وضوء الشمس « أبيض » ولكن بعد المرور خلال المنشور يتحول ضوء الشمس « الأبيض » إلى جميع الألوان الموجودة فى الكون . والطبيعة نفسها تعطينا نفس النتيجة فى قوس قزح الجميل . ومنذ قديم الأزل توجد محاولات لتفسير هذه الظاهرة ، والعقبة الموجودة فى الأنجيل التى تقول بأن قوس قزح هو توقيع الله على معاهدة مع الإنسان هى « نظرية » من وجهة نظر معينة ، ولكنها لا تفسر لماذا يتكرر قوس قزح من وقت لآخر عند نزول المطر . ونيوتن هو أول من عالج لفر اللون بأكمله وبطريقة علمية كما أشار إلى حله فى عمله العظيم .

يكون أحد حدّى قوس قزح دائماً أحمر بينما يكون الآخر بنفسجياً وبين هذين اللونين توجد جميع الألوان الأخرى بترتيب معين . وتفسير نيوتن لهذه الظاهرة هو ما يأتى : توجد جميع الألوان فعلاً فى الضوء الأبيض . وهذه الألوان تنتقل جميعها بين الكواكب وفى الجو متحدة ببعضها فىكون لها تأثير الضوء الأبيض ، ويمكننا أن نقول أن الضوء الأبيض هو مزيج من جسيمات مختلفة تناظر ألواناً مختلفة . وفى التجربة التى أجراها نيوتن ، يشتت المنشور هذه الألوان المختلفة فى الفضاء . حسب النظرية الميكانيكية للضوء يكون السبب فى الانكسار هو قوى تنتج عن جزيئات الزجاج وتؤثر على جسيمات الضوء . وتختلف القوى التى تؤثر على الجسيمات التى تنسب إلى الألوان المختلفة ، فتكون أشد ما يمكن للون البنفسجى وأضعف ما يمكن للون الأحمر . وعلى ذلك تأخذ الألوان المختلفة مسارات مختلفة بعد انكسارها وتفرق عند ما يترك الضوء المنشور . وفى حالة قوس قزح تقوم قطرات الماء بعمل المنشور .

لقد أخذت النظرية الجسيمية للضوء صورة أكثر تعقيداً من صورتها الأولى ، فبدلاً من نوع واحد فقط لدينا الآن أنواعاً مختلفة من الضوء الجسيمى ، وكل نوع له لون معين . ومع ذلك فيجب إذا كانت هذه النظرية صحيحة ، أن تتفق نتائجها مع المشاهدات .

تسمى مجموعة الألوان الموجودة في ضوء الشمس الأبيض (كما وجدها نيوتن) طيف الشمس ، أو بتعبير أدق طيف الشمس المرئي . ويسمى تحليل الضوء الأبيض إلى مركباته ، كما وصفناه هنا ، تشتت الضوء . وإذا كان التفسير الذي أعطيناه صحيحاً ، فإنه يمكن مزج ألوان الطيف المتفرقة مرة أخرى باستعمال منشور آخر يوضع في وضع معين ، ويجب أن تكون العملية الجديدة عكس العملية الأولى بالضبط . يجب أن نحصل على الضوء الأبيض من الألوان التي تفرقت بالعملية السابقة . والواقع أن نيوتن قد برهن بهذه التجربة البسيطة أنه يمكن الحصول على الضوء الأبيض من طيفه وعلى الطيف من الضوء الأبيض أى عدد المرات . ولقد أيدت هذه التجارب تأييداً قوياً النظرية التي فيها تبدو جسيمات كل لون كمادة غير قابلة للتغيير .

وكتب نيوتن يقول :

« وهذه الألوان ليست ألواناً حديثة التولد ولكنها تظهر نتيجة لتفريقها فقط ، وذلك لأننا إذا مزجناها مرة أخرى فإننا نحصل على لونها قبل التفريق . ولنفس هذا السبب لا يحدث أى تحول حقيقى عند مزج الألوان المتفرقة وذلك لأنه عند تفريق هذه الألوان المتجمعة ثانية تظهر نفس الألوان التي ظهرت عند تشتيت الضوء الأبيض أول مرة . ويمكن تمثيل ذلك بعملية مزج مسحوقين أحدهما أصفر والآخر أزرق مزجاً جيداً . للعين المتجردة يظهر الخليط كأنه ذو لون أخضر رغم أن لون ذرات المسحوقين لم يتغير حقيقة ؛ وباستعمال ميكروسكوب جيد تظهر الذرات متفرقة بلونها الأزرق والأصفر » .

نفرض أننا عزلنا شريحة ضيقة جداً من الطيف . هذا يعنى أننا نسمع للون واحد فقط بأن يمر من شق ضيق طويل بينما تحجز الألوان الأخرى على حاجز . يكون الضوء الذى يمر من هذا الثقب متجانساً ، أى ضوء لا يمكن تحليله إلى مركبات أخرى . والعبارة السابقة تنتج من النظرية وقد تحقق بالتجربة أنه لا يمكن بأى حال من الأحوال تقسيم هذا الشعاع ذى اللون الواحد مرة أخرى . وهناك طرق بسيطة للحصول على مصادر للضوء المتجانس . فمثلاً يشع الصوديوم الساخن

ضوءاً منتظماً ذا لون أصفر . ويكون من الأنسب في أغلب الأحيان إجراء بعض التجارب الضوئية باستعمال ضوء منتظم وذلك لأن النتيجة ، كما ننتظر ، تكون أبسط كثيراً .

لنفرض الآن فرضاً غريباً وهو أن الشمس قد بدأت فجأة تشع ضوءاً منتظماً ذا لون معين ، أصفر مثلاً . نتيجة لذلك تختفي جميع الألوان الموجودة في الكون عدا اللون الأصفر . ويكون لون أى جسم إما أصفر أو أسود ! . وليس هذا إلا نتيجة للنظرية الجسيمية للضوء لأنه لا يمكن الحصول على ألوان جديدة من الضوء المنتظم . ويمكن التحقق من صحة ذلك بالتجربة . إذا وضعنا قطعة سوديوم ساخنة جداً في حجرة مظلمة فإن لون أى شيء في هذه الحجرة يكون إما أصفر أو أسود . والواقع أن اختلاف الألوان في الكون يدل على كثرة الألوان التي تكون الضوء الأبيض .

يبدو أن النظرية الجسيمية للضوء تنجح في شرح جميع هذه الحالات تماماً ، رغم أن إدخال أنواع جديدة من الجسيمات بعدد الألوان المختلفة يضابق بعض الشيء . ويبدو أيضاً الفرض بأن جميع جسيمات الضوء تسير بنفس السرعة فرضاً متكلفاً وغير حقيقى .

ويمكننا أن نتخيل أن نظرية مختلفة تمام الاختلاف ومبنية على مجموعة من الفروض الأخرى قد تعطى التفسيرات المطلوبة ولا تجد ما يعارضها . وفي الواقع أننا سنشهد في القريب العاجل نشأة نظرية أخرى مبنية على أفكار مختلفة تماماً عن الأفكار السابقة وبالرغم من ذلك فإنها تفسر نفس مجموعة الظواهر الضوئية التي فسرتها النظرية السابقة . وقبل صياغة الفروض التي تعتمد عليها النظرية الجديدة يتحتم علينا أن نجيب على سؤال يتعلق بهذه الاعتبارات الضوئية . يجب علينا أن نعود إلى الميكانيكا ونسأل :

ماهية الموجة ؟

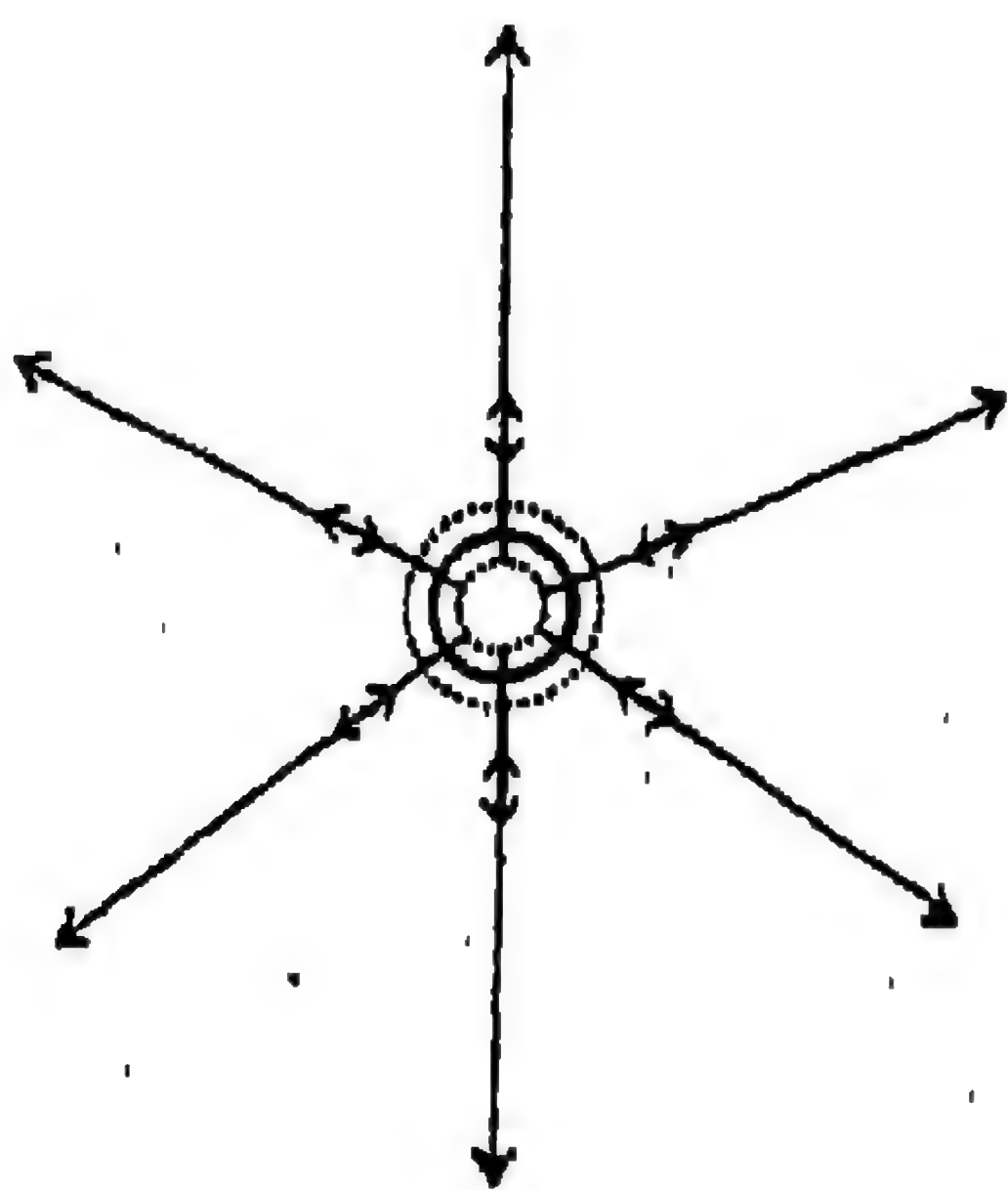
إذا نشأت إشاعة في لندن فإنها تصل إلى أدنبرة بسرعة رغم عدم انتقال أى شخص ممن اشترك في نشرها بين هاتين المدينتين . تصادفنا الآن حركتان مختلفتان ، حركة الإشاعة من لندن إلى أدنبرة وحركة الأشخاص الذين ينشرون الإشاعة . والريح التي تمر فوق حقل من القمح تسبب موجة تفتشر عبر الحقل كله . مرة ثانية يجب علينا أن تميز بين حركة الموجة وحركة سنابل القمح المختلفة التي لانعاني إلا ذبذبات صغيرة .

كلنا قد رأينا الموجات التي تنتشر في دوائر تتسع تدريجياً عند إلقاء حجر في بركة ماء . حركة الموجة تختلف تماماً عن حركة جسيمات الماء . الجسيمات ترتفع وتنخفض فقط . والحركة الموجية التي نشاهدها هي حركة حالة من حالات المادة وليست حركة المادة نفسها . ويتضح ذلك تماماً من حركة قطعة من الفلين طافية فوق الماء ، فهي تعلق وتنخفض فقط تبعاً لحركة الماء بدلاً من أن تسير مع الموجة . ولكي نفهم التركيب الميكانيكي للموجة ، سنعتبر تجربة مثالية أخرى . نفرض أن فراغاً كبيراً مملوء بانتظام بالماء أو الهواء أو أى وسط آخر ، وأنه توجد كرة في موضع متوسط من هذا الفراغ . لنفرض أنه عند بدء التجربة لا توجد حركة على الإطلاق ، وفجأة تبدأ الكرة في « التنفس » توافقياً ، فيزداد حجمها وينقص رغم احتفاظها بشكلها الكروي . ترى ماذا يحدث في الوسط الموجودة فيه الكرة نتيجة لهذه الحركة ؟

نبدأ دراستنا في اللحظة التي تبدأ فيها الكرة في التمدد . تدفع جزيئات الوسط الموجودة في الجوار المباشر للكرة بعيداً ، وعلى ذلك تزداد كثافة قشرة كروية من الماء (أو الهواء) عن قيمتها العادية . بالمثل ، عندما تنقبض الكرة تصغر كثافة جزء الماء الذي يحيط مباشرة . وتنتشر هذه التغيرات في الكثافة خلال الوسط كله . وتعمل الجسيمات المكونة للوسط ذبذبات صغيرة فقط ، ولكن الحركة الناتجة جميعها هي حركة موجة تقدمية . والشئ الأساسى هنا ، هو أننا نعتبر لأول مرة حركة شئ ليس بمادة وإنما هو طاقة منقولة خلال المادة . باستعمال مثال الكرة النابضة يمكننا إدخال فكرتين طبيعيتين عامتين .

الفكرة الأولى هي السرعة التي تتحرك بها الموجة . تتوقف هذه السرعة على الوسط فتختلف في الماء عنها في الهواء مثلاً . والفكرة الثانية هي طول الموجة . في حالة الأمواج التي تنشأ على سطح بحر أو نهر يكون طول الموجة هو البعد بين قمتي موجتين متتاليتين أو البعد بين قاعى موجتين متتاليتين . وعلى ذلك يكون طول الموجة في حالة موجات البحر أكبر من طول الموجة في حالة موجات النهر . وفي حالة الموجات التي تحدث نتيجة لـكرة النابضة يكون طول الموجة هو البعد ، عند لحظة معينة ، بين قشرتين كرويتين متجاورتين ، كثافتهما إما نهاية عظمى أو نهاية صغرى . من الواضح أن هذا الطول كما يتوقف على الوسط يتوقف أيضاً على معدل نبض الكرة ، فإذا كان نبض الكرة سريعاً فإن طول الموجة يقصر وإذا كان نبض الكرة بطيئاً فإن طول الموجة يزداد .

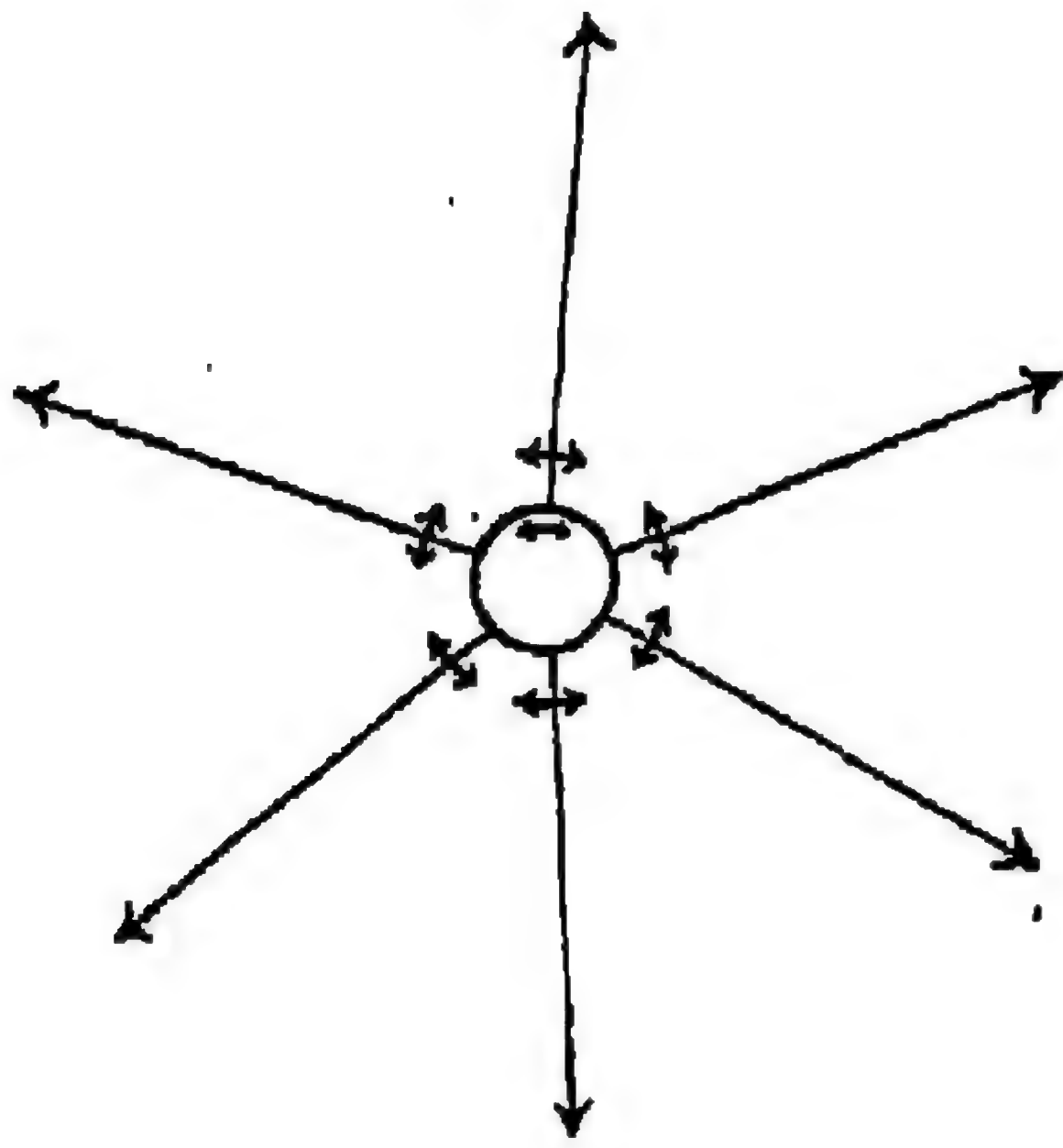
لقد أحرزت فكرة الموجة هذه نجاحاً كبيراً في علم الطبيعة ، ومن المؤكد أنها فكرة ميكانيكية ، إذ تفسر الظواهر بدلالة حركة جسيمات وحسب نظرية الحركة ، تكون هذه الجسيمات المادة . وعلى ذلك يمكن على العموم اعتبار أية نظرية تستخدم فيها فكرة الموجة نظرية ميكانيكية . فمثلاً أساس تفسير الظواهر الصوتية هو هذه الفكرة . فالأجسام المتذبذبة — مثل الأوتار الصوتية وأوتار القيثارة — هي مصادر للموجات الصوتية التي تنتشر في الهواء بنفس الطريقة التي شرحناها في حالة الكرة النابضة . وعلى ذلك يمكننا أن نضم جميع الظواهر الصوتية إلى الميكانيكا باستعمال فكرة الموجة .



لقد وضحنا أنه يجب التمييز بين حركة الجسيمات وبين حركة الموجة نفسها التي هي حالة للوسط . ورغم أن الحركتين مختلفتان فإنه من الواضح في مثال الكرة النابضة أن الحركتين تكونان في نفس المستقيم . تتذبذب جسيمات الوسط في أجزاء صغيرة خطية ، ويزداد الكثافة وتنقص دورياً مع هذه الحركة . والاتجاه الذي تنتشر فيه

الموجة هو نفس الخط الذي تقع عليه الذبذبات . ويسمى هذا النوع من الموجات موجات طولية . ولكن هل هذا هو النوع الوحيد من الموجات ؟ من المهم لدراستنا التالية أن ندرك إمكان وجود نوع آخر من الموجات يسمى بالموجات المستعرضة .

فلنغير مثالنا السابق . نفمس الكرة هذه المرة في وسط من نوع آخر ، مثلاً الغراء بدلاً من الماء أو الهواء . وبدلاً من أن تنبض الكرة سنجعلها تدور زاوية صغيرة في اتجاه واحد ثم تعود ثانية على أن تكون الحركة توافقية دائماً وحول محور معين . يلتصق الغراء بالكرة وعلى ذلك تجبر أجزاء الغراء الملتصقة على أن تقلد الحركة ، وهذه الأجزاء تجبر كذلك الأجزاء الموجودة على بعد صغير منها على أن تقلد نفس الحركة ، وهكذا . بذلك تكون موجة في الوسط ، وإذا تذكرنا



التمييز بين حركة الوسط وحركة الموجة فإننا نرى أنهما لا يقفا على نفس الخط في هذه الحالة . تنتقل الموجة في اتجاه نصف قطر الكرة بينما يتحرك الوسط عمودياً على هذا الاتجاه . بذلك تكون موجة مستعرضة قد تولدت ..

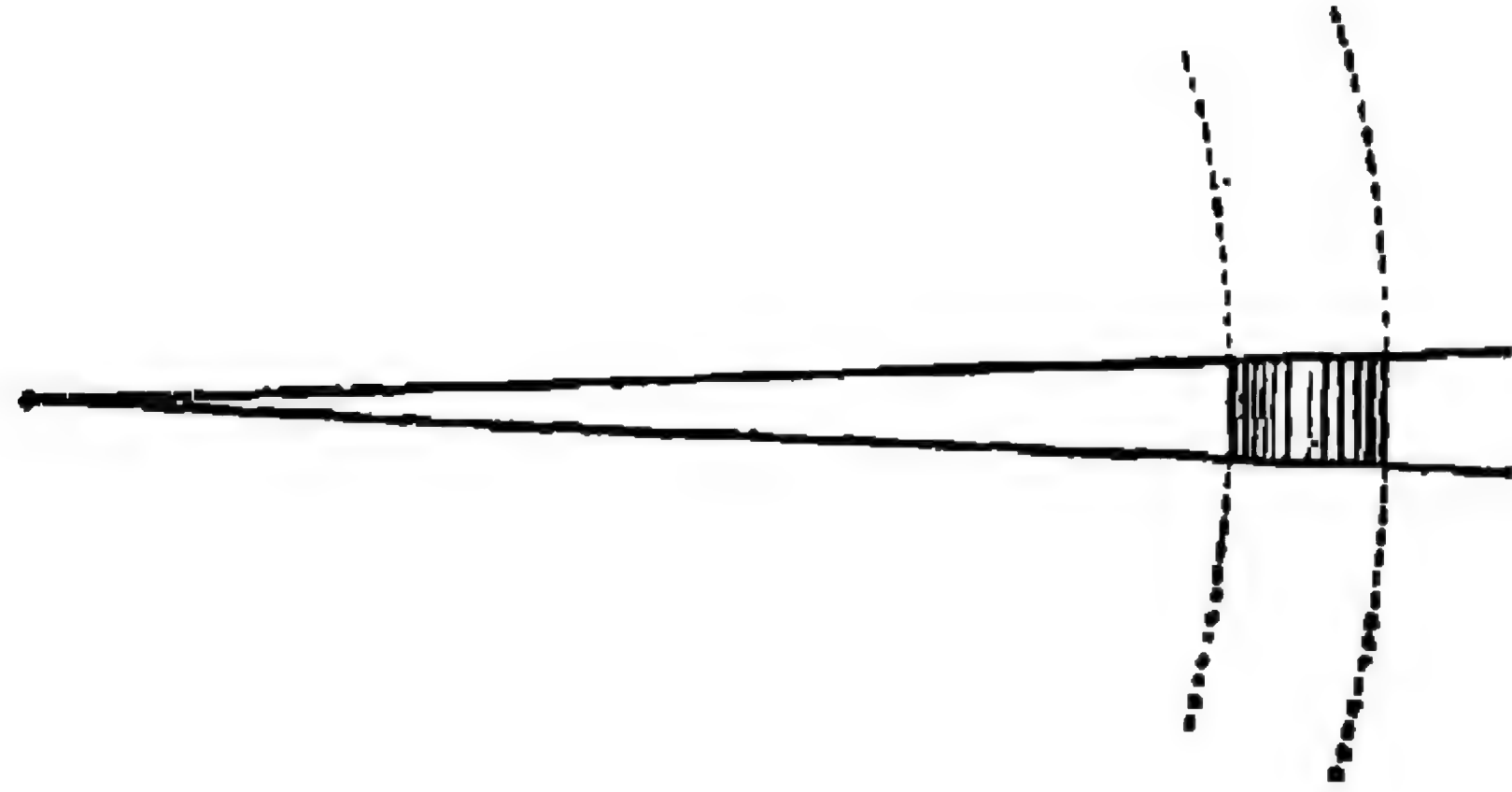
والموجات التي تنتشر على سطح الماء

هي موجات مستعرضة . إذ أنه بينما

تنتشر الموجة في مستو أفقي ، تتحرك قطعة من الفلين طافية رأسياً إلى أعلى وإلى أسفل . أما الموجات الصوتية فهي أكثر الأمثلة المألوفة للموجات الطولية .

وثمة ملاحظة أخرى أخيرة : الموجة الناتجة عن كرة نابضة أو متذبذبة هي موجة كرية وسبب هذه التسمية هو أنه عند أي لحظة معينة تسلك جميع النقاط الموجودة على سطح كرة محيطة بمصدر الموجة نفس السلوك . لنعبر قطعة من كرة مثل هذه على بعد كبير من المصدر . كلما كانت القطعة صغيرة وبعيدة كلما كانت تشبه قطعة مستوية ، ويمكننا أن نقول دون أن ندعى درجة كبيرة

في الدقة ، أنه لا يوجد فرق أساسي بين قطعة مستوية وبين قطعة من كرة نصف قطرها كبير جداً ، وفي كثير من الأحيان تسمى الأجزاء الصغيرة من موجات كرية بعيدة جداً عن المصدر موجات مستوية . وكلما كان الجزء المظلل في الرسم



بعيداً عن المركز والزاوية المحصورة بين نصفي القطرين صغيرة ، كلما كان تمثيل الموجة المستوية أفضل . وفكرة الموجة المستوية ، مثل كثير من الأفكار الطبيعية الأخرى ، ليست إلا حياًلاً يمكن تحقيقه إلى درجة محدودة من الدقة فقط . ومع ذلك فهي فكرة مفيدة سنحتاج إليها فيما بعد .

النظرية الموجية للضوء :

دعنا نتذكر لماذا توقفنا عن وصف الظواهر البصرية . كان غرضنا هو إدخال نظرية جديدة للضوء تختلف عن نظرية الجسيمات ولكنها تفسر الحقائق التي سبق ذكرها . وللقيام بذلك ، اضطررنا إلى أن نقطع قصتنا وندخل فكرة الموجات . والآن يمكننا أن نعود إلى هذا الموضوع .

وكان هيجنز - أحد معاصري نيوتن - هو الذي وضع نظرية جديدة تماماً للضوء ؛ وقد كتب هيجنز في مؤلفه عن الضوء يقول :

وإذا كان الضوء يستغرق وقتاً لا يتناهى (وهي المسألة التي سنبحثها الآن) فإنه ينتج أن هذه الحركة - الدخيلة على مادة الوسط - متوالية وعلى ذلك فهي تنتشر على هيئة سطوح كرية مثل الموجات الصوتية . وأنا أسميها موجات ، للتشابه الموجود بينها وبين الموجات التي تتكون في الماء عندما يلقي بحجر فيه والتي تنتشر على

هيئة دوائر متتالية رغم أن الموجات في الحالة الأخيرة توجد جميعها في مستو واحد .

وفي رأى هيجنز أن الضوء هو موجة ، أى هو انتقال للطاقة لا للمادة . ولقد رأينا أن نظرية الجسيمات تفسر كثيراً من الحقائق المشاهدة . هل تؤدي النظرية الموجية نفس المهمة ؟ يجب أن نسأل نفس الأسئلة التي أجيب عليها بواسطة نظرية الجسيمات وذلك لكي نرى هل يمكن الإجابة عليها بواسطة النظرية الموجية أيضاً . وسنعمل ذلك هنا في صورة حوار بين هـ ، هـ حيث هـ شخص يعتقد بصحة نظرية نيوتن ، هـ شخص يعتقد بصحة نظرية هيجنز . ولن يستعمل أيهما أى نتائج حصل عليها بعد انتهاء عمل هذين العالمين الفذين :

هـ — في نظرية الجسيمات يوجد معنى محدد تماماً لسرعة الضوء ، فهي السرعة التي تسير بها الجسيمات في الفراغ المطلق . ولكن ماذا نعى بسرعة الضوء في النظرية الموجية ؟

هـ — في النظرية الموجية تكون سرعة الضوء هي سرعة موجة الضوء ، فمن المعلوم أن كل موجة تنتشر بسرعة معينة . وهذا يسرى على موجة الضوء أيضاً . هـ — رغم أن هذا الكلام يبدو بسيطاً فهو ليس كذلك . فموجات الصوت تسير في الهواء ، وموجات المحيط تسير في الماء ولا بد لكل موجة من وسط مادي تسير فيه ولكن الضوء يسير في الفراغ المطلق رغم عدم إمكان سير الصوت فيه . وفي الواقع أن فرض سير الموجة في الفراغ المطلق يعنى عدم فرض وجود موجات على الإطلاق .

هـ — نعم هذه صعوبة ولكنها ليست جديدة على . لقد فكر أستاذي فيها جيداً ووجد أن الطريقة الوحيدة للتخلص من هذه الصعوبة ، هو : نفرض وجود شيء مادي « الأثير » شفاف وينفذ خلال الكون كله . وبمجرد أن توجد لدينا الشجاعة لإدخال هذه الفكرة فإن كل شيء آخر يصبح واضحاً ومقنعاً . هـ — ولكنى أعترض على مثل هذا الفرض . فأولا بهذا الفرض ندخل

تنبأ مادياً جديداً مع أن لدينا كثيراً من هذه الأشياء في علم الطبيعة . ويوجد سبب آخر للاعتراض . فأنت دون شك تعتقد بوجود تفسير كل شيء بدلالة الميكانيكا ، ولكن ماذا عن الأثير ؟ هل يمكن الإجابة على السؤال البسيط الآتي : كيف يتركب الأثير من جسيمات صغيرة أولية وكيف يظهر في الظواهر الأخرى ؟ ه — من المؤكد أن اعتراضك الأول وجيه . ولكن بإدخال الأثير الذي لا وزن له ، وهو مصطنع إلى حد ما ، نتخلص على الفور من فكرة جسيمات الضوء وهي فكرة أكثر بعداً عن الحقيقة ، ويصبح لدينا شيء واحد بدلاً من عدد لا نهائي من هذه الموجودات التي تناظر العدد الكبير من الألوان الموجودة في الطيف . ألا تظن أن هذا تقدم حقيقي ؟ على الأقل تكون جميع الصعوبات قد تركزت في نقطة واحدة . بهذا الفرض نستغنى عن الفرض الغريب وهو أن جسيمات ألوان الضوء المختلفة تسير بنفس السرعة في الفراغ المطلق . وحجتك الثانية صحيحة أيضاً . لا يمكن إعطاء تفسير ميكانيكي للأثير . ولكن لا يوجد أدنى شك في أن الدراسة المستفيضة للظواهر الضوئية وغيرها من الظواهر الأخرى ستكشف عن تركيب الأثير . وفي الوقت الحالى يجب علينا أن ننتظر تجارب جديدة ونتائج جديدة ، وأخيراً أرجو أن نوفق في التغلب على صعوبة تفسير التركيب الميكانيكي للأثير .

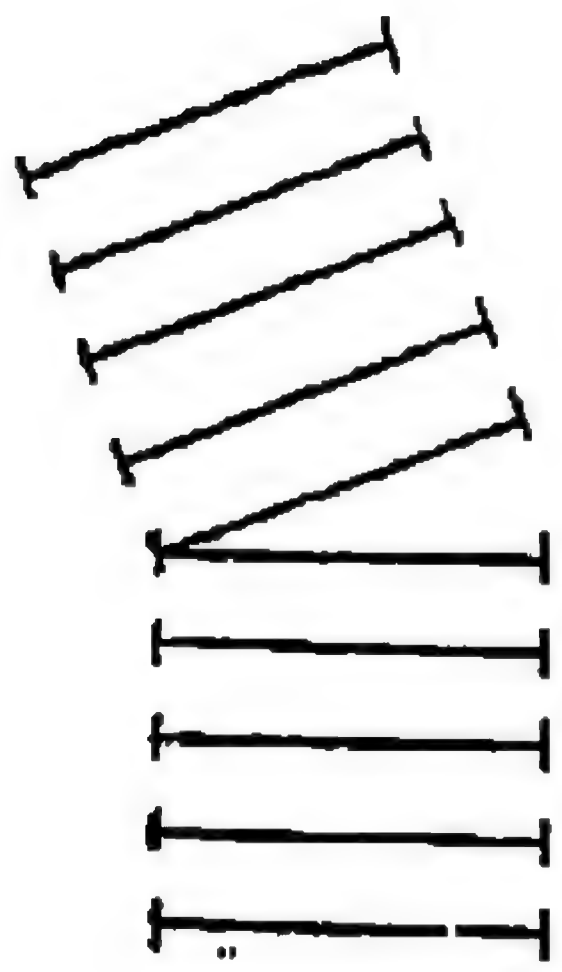
ه — لنترك هذا السؤال الآن لعدم إمكان الإجابة عليه إجابة محددة . أود أن أعلم كيف تتمكن بواسطة نظريتك من تفسير الظواهر التي تتضح ويمكن فهمها بواسطة نظرية الجسيمات . اعتبر مثلاً ظاهرة سير أشعة الضوء في الفراغ أو في الهواء في خطوط مستقيمة . إذا وضعنا ورقة أمام شمعة فإن ظلها يكون واضحاً وحاداً تماماً . إذا كانت النظرية الموجبة للضوء صحيحة ، فإنه يتعذر الحصول على ظلال محددة ، وذلك لأن الموجات تنشئ حول أحرف الورقة وتشوه الظل . وكما تعلم لا يعتبر قارب صغير عقبة أمام أمواج البحر ، فهي تنشئ حوله ببساطة دون أن تحدث ظلاً .

ه — ليست هذه بحجة مقنعة . اعتبر حالة موجات قصيرة على نهر تقابل

جانب سفينة كبيرة . لا تظهر الموجات الناشئة على أحد جانبي السفينة في الجانب الآخر . وإذا كانت الموجات صغيرة والسفينة كبيرة بدرجة كافية فإنه يظهر ظل واضح . ومن المحتمل جداً أن الضوء يظهر فقط كأنه يسير في خطوط مستقيمة لأن طول موجته صغير جداً بالنسبة إلى حيز الأجسام العادية والثقوب المستخدمة في التجارب . ومن الجائز أن يظهر الظل إذا أمكننا إيجاد عقبة صغيرة صغراً كافياً . وسنقابل صعوبات عملية كبيرة إذا حاولنا تصميم جهاز يبين ما إذا كان الضوء ينحني أم لا . ومع ذلك فإنه إذا أمكن تصميم مثل هذه التجربة فإنها تكون تجربة حاسمة بين النظرية الموجية ونظرية الجسيمات للضوء .

هـ — قد تؤدي النظرية الموجية إلى حقائق جديدة في المستقبل ، ولكن لا أعلم عن أية أحصائيات وجدت بالتجربة تتفق مع هذه النظرية بطريقة مقنعة . ومادام لم يثبت بالتجربة إمكان انحناء الضوء فإنني لا أجد ما يمنع الاعتقاد بصحة نظرية الجسيمات ، وهي في نظري أبسط من النظرية الموجية ، وعلى ذلك فهي أفضل . سنقطع هذه المحادثة عندهذه النقطة رغم أن الموضوع لا يزال يستوجب الدراسة . يبقى أن نبين كيف تفسر النظرية الموجية انكسار الضوء والألوان المختلفة . وكما نعلم ، تمكنا نظرية الجسيمات من تفسير هذه الظواهر . سنبدأ أولاً بالانكسار وسيكون من المفيد أن نعتبر مسألة لا علاقة لها بعلم البصريات .

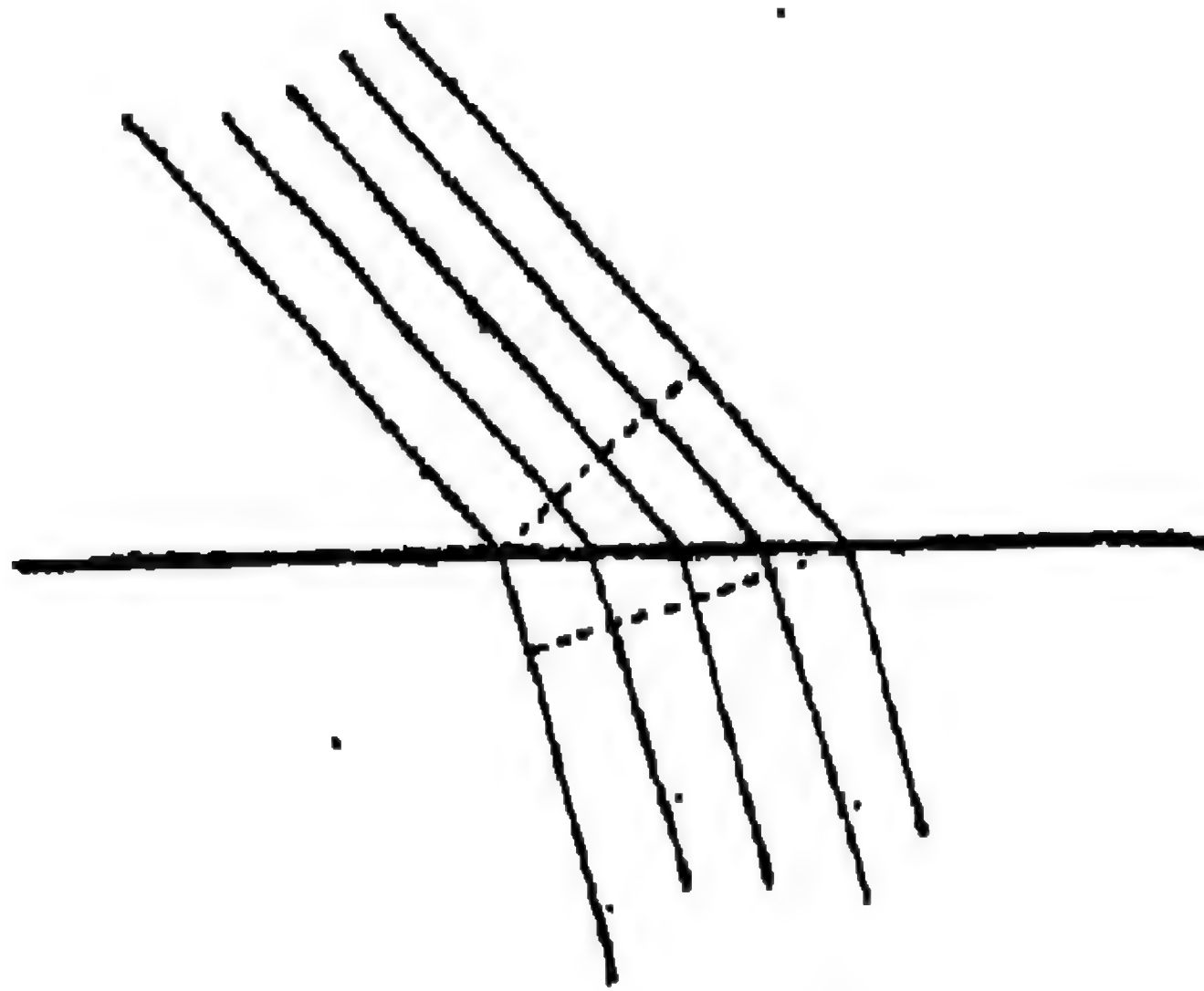
اعتبر رجلين يسيران في طريق ممتد ويحملان عصاً مستقيمة بينهما . ونفرض أن الرجلين كانا يسيران أولاً بنفس السرعة إلى الأمام . مادامت سرعة الرجلين واحدة ، صغيرة كانت أم كبيرة ، فإن العصا تعاني إزاحات متوازية ، أي أن اتجاهها لا يتغير . وتكون جميع أوضاع العصا موازية لوضعها الابتدائي . نفرض أن حركة الرجلين اختلفت في فترة زمنية معينة (قد تكون هذه الفترة صغيرة مثل جزء من الثانية) . ماذا يحدث ؟ من الواضح أن العصا تدور في أثناء هذه الفترة . أي أن إزاحاتها لا تكون موازية لوضعها الأول . وإذا سار الرجلان مرة أخرى بسرعة واحدة فإن اتجاه العصا الجديد يكون مخالفاً لاتجاهها الأول .



والرسم يبين ذلك بوضوح . وقد حدث التغير في الاتجاه أثناء الفترة الزمنية التي اختلفت فيها سرعة الرجلين .

سيمكننا هذا المثال من فهم معنى انكسار الموجة . لنفرض أن موجة مستوية تسير في الأثير قد قابلت لوحاً من الزجاج . نرى في الرسم التالي موجة لها جبهة عريضة نسبياً ، أثناء انتشارها . وجبهة الموجة هي مستوى تكون حالة جميع أجزاء الأثير عليه واحدة عند أى لحظة معينة .

وحيث أن السرعة تعتمد على الوسط الذي يمر فيه الضوء فإن سرعة الضوء



في الزجاج تختلف عن سرعته في الفراغ المطلق . وفي خلال الفترة الزمنية القصيرة جداً التي تدخل فيها جبهة الموجة الزجاج ، تختلف سرعة الأجزاء المختلفة من هذه الجبهة . إذ أنه من الواضح أن الجزء الذي يكون

قد دخل الزجاج يسير بسرعة الضوء في الزجاج بينما يسير الجزء الباقي بسرعة الضوء في الأثير . ونتيجة لاختلاف سرعة أجزاء جبهة الموجة خلال فترة « الانقماش » في الزجاج يتغير اتجاه الموجة نفسها .

على ذلك نرى أن النظرية الموجية ، مثل نظرية الجسيمات ، تؤدي إلى تفسير لظاهرة الانكسار . بالتعمق في الدراسة مع الاستعانة بعلم الرياضيات تبين أن تفسير النظرية الموجية أبسط وأفضل وأن نتائجها تتفق تماماً مع المشاهدات . وفي الواقع تمكننا الطرق الكمية المنطقية من استنتاج سرعة الضوء في وسط يكسره إذا علمنا الكيفية التي ينكسر بها الشعاع عند مروره في الوسط .

تبقى الآن مسألة اللون .

يجب أن نتذكر أن ما يميز موجة هـا عددان ، سرعتها وطول موجتها . والفرض الأساسي في النظرية الموجية للضوء هو أن أطوال الموجات المختلفة تناظر ألواناً مختلفة . فيختلف طول موجة الضوء الأحمر عن طول موجة الضوء البنفسجي . وهكذا بدلاً من الفرض الذي يصعب قبوله والذي يقول بأن كل لون له جسيمات معينة ، لدينا الآن الاختلاف الطبيعي في أطوال الموجات . على ذلك نستطيع وصف تجارب نيوتن في تشتت الضوء بلغتين مختلفتين ، لغة نظرية الجسيمات ، ولغة النظرية الموجية ، فمثلاً :

لغة الموجة

الأشعة التي أطوال موجاتها مختلفة والتي تشير إلى مختلف الألوان تسير بنفس السرعة في الأثير وبسرع مختلفة في الزجاج .

يتركب الضوء الأبيض من جميع الأمواج ذات الأطوال المختلفة وتنفرد هذه الموجات في الطيف .

لغة الجسيمات

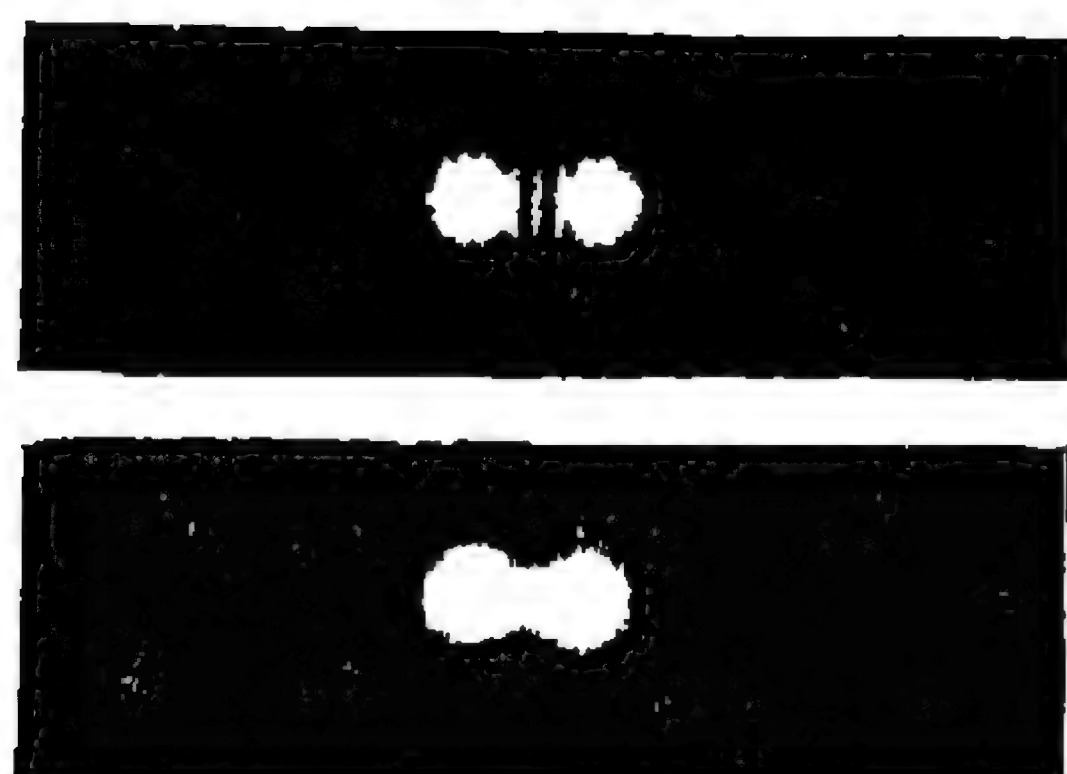
تسير جسيمات الألوان المختلفة بسرعة واحدة في الفراغ وبسرع مختلفة في الزجاج .

يتركب الضوء الأبيض من جسيمات الألوان المختلفة وتنفرد هذه الجسيمات في الطيف .

ويبدو أنه من المستحسن تجنب الالتباس الناشئ من وجود نظريتين مختلفتين لنفس الظواهر وذلك باختيار واحدة منهما بعد دراسة مزايا وأخطاء كلا منهما جيداً . وتبين لنا المحادثة بين هـ ، هـ أن هذا العمل ليس سهلاً على الإطلاق . ويكون القرار عند هذه النقطة مسألة اختيارية تختلف من شخص لآخر ولن يكون ناتجاً عن اقتناع علمي ، وقد فضل أغلب العلماء في عهد نيوتن وبعده بأكثر من مائة عام نظرية الجسيمات .

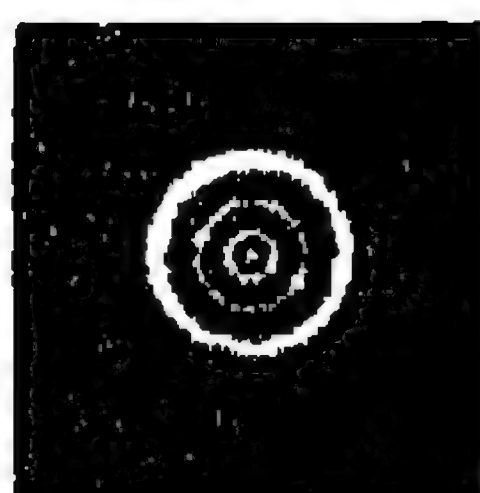
وبعد ذلك بزمان طويل ، في منتصف القرن التاسع عشر جاء حكم التاريخ في صالح النظرية الموجية ضد نظرية الجسيمات . لقد قال هـ في محادثته مع هـ أن

اللوحة الثانية

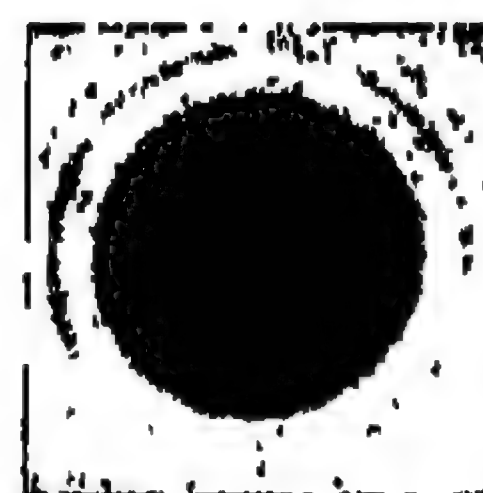


(أخذ الصورة ف . ارКАДيف)

في الصورة الفوتوغرافية العليا نرى بقعتين ضوئيتين نتجتا عن مرور حزميتين من الأشعة خلال ثقب دبوس على التوالي . (أى أن أحد الثقبين فتح أولاً ثم غطى بعد ذلك وفتح الآخر) . في الصورة السفلى نرى شرائح رأسية نتجت عن مرور الضوء في وقت واحد خلال الفتحتين .



(أخذ الصورتين ف . ارКАДيف)



حيود الضوء المار خلال
ثقب صغير

حيود الضوء بانثنائه
حول عقبة صغيرة

الحسم بين النظريتين بالتجربة ممكن من ناحية البدء . فنظرية الجسيمات لا تسمح للضوء بالانحناء وتتطلب وجود ظلال حادة . أما حسب النظرية الموجية فإن عقبة صغيرة صغيراً كافياً لا تسبب ظلاً ، وقد حقق يونج وفريزيل هذه الحقيقة فعلياً كما حصلوا على نتائج نظرية .

سبق أن وصفنا تجربة بسيطة للغاية ، يوضع فيها حاجز به ثقب أمام مصدر ضوئي وبذلك يظهر ظل على الحائط . سنبسّط التجربة أكثر وذلك بفرض أن المصدر الضوئي يشع ضوءاً متجانساً ، ولكي نحصل على نتائج جيدة يجب أن يكون المصدر الضوئي قوياً . لنفرض الآن أن الثقب الموجود في الستارة قد أخذ يصغر تدريجياً . إذا استعملنا مصدراً ضوئياً قوياً وأفلحنا في جعل الثقب صغيراً بدرجة كافية فإننا نشاهد ظاهرة جديدة غريبة لا يمكن تفسيرها بنظرية الجسيمات . لن نجد أى تحديد ظاهر بين الضوء والظلام . سنشاهد حول البقعة المضيئة أن الضوء يخفت تدريجياً في المنطقة المظلمة مع ظهور سلسلة من الحلقات المضيئة والمظلمة . وظهور الحلقات هو من أخص مميزات أية نظرية موجية . ويتضح تفسير توالى المناطق المضيئة والمظلمة من تجربة أخرى تختلف بعض الشيء عن التجربة السابقة . نفرض أن لدينا ورقة مظلمة بها ثقباً دبوس يمكن للضوء المرور منهما . إذا كان الثقبان قريبين من بعضهما وصغيرين جداً ، وكان مصدر الضوء المتجانس قوياً فإن كثيراً من الشرائط المضيئة والمظلمة تظهر على الحائط وتخفت تدريجياً في الظلام عند الجوانب . وتفسير ذلك بسيط ، يوجد الشريط المظلم في المكان الذى يقابل فيه قاع موجة منبعثة من الثقب الأول قمة موجة منبعثة من الثقب الثانى وذلك لأنهما يتعادلان . ويوجد الشريط المضيء في المكان الذى يتقابل فيه قمتان (أو قاعان) من الثقبين ، إذ تقويان بعضهما . وتفسير الحلقات المضيئة والمظلمة في حالة وجود ثقب واحد أكثر تعقيداً منه في المثال السابق ، ولكن الفكرة واحدة . ويجب أن نتذكر ظهور الشرائط المضيئة والمظلمة في حالة وجود الثقبين والحلقات المضيئة والمظلمة في حالة وجود ثقب واحد جيداً وذلك لأننا سنعود إلى دراسة هاتين الصورتين المختلفتين فيما بعد .

والتجربة التي وصفناها هنا تبين حيود الضوء أى الانحراف عن السير في خطوط مستقيمة عند مقابلة موجة الضوء لثقوب أو عقبات صغيرة .

بالاستعانة بقليل من الرياضة ، يمكن أن نذهب إلى أبعد من ذلك بكثير فمن الممكن تحديد درجة صغر طول الموجة التي نحصل بها على نموذج معين للحلقات . وعلى ذلك تمكنا التجارب التي شرحناها هنا من قياس طول موجة الضوء المتجانس المستعمل كمصدر . ولكي نعطي القارىء فكرة عن درجة صغر هذه الأعداد سنذكر طول موجتى الضوء الأحمر والبنفسجى وهما اللونان المحددان لطيف الشمس :

طول موجة الضوء الأحمر ٠,٠٠ ٠٠٨ سم

» » » البنفسجى ٠,٠٠ ٠٠٤ سم

يجب ألا ندهش لصغر هذه الأعداد ، ونحن نشاهد ظاهرة الظل المحدد (أى ظاهرة سير الضوء في خطوط مستقيمة) في الطبيعة لأن حيز العقبات والثقوب يكون في العادة كبيراً جداً بالنسبة إلى طول موجة الضوء . ولا تظهر الصفات الموجية للضوء إلا باستعمال عقبات وثقوب صغيرة جداً .

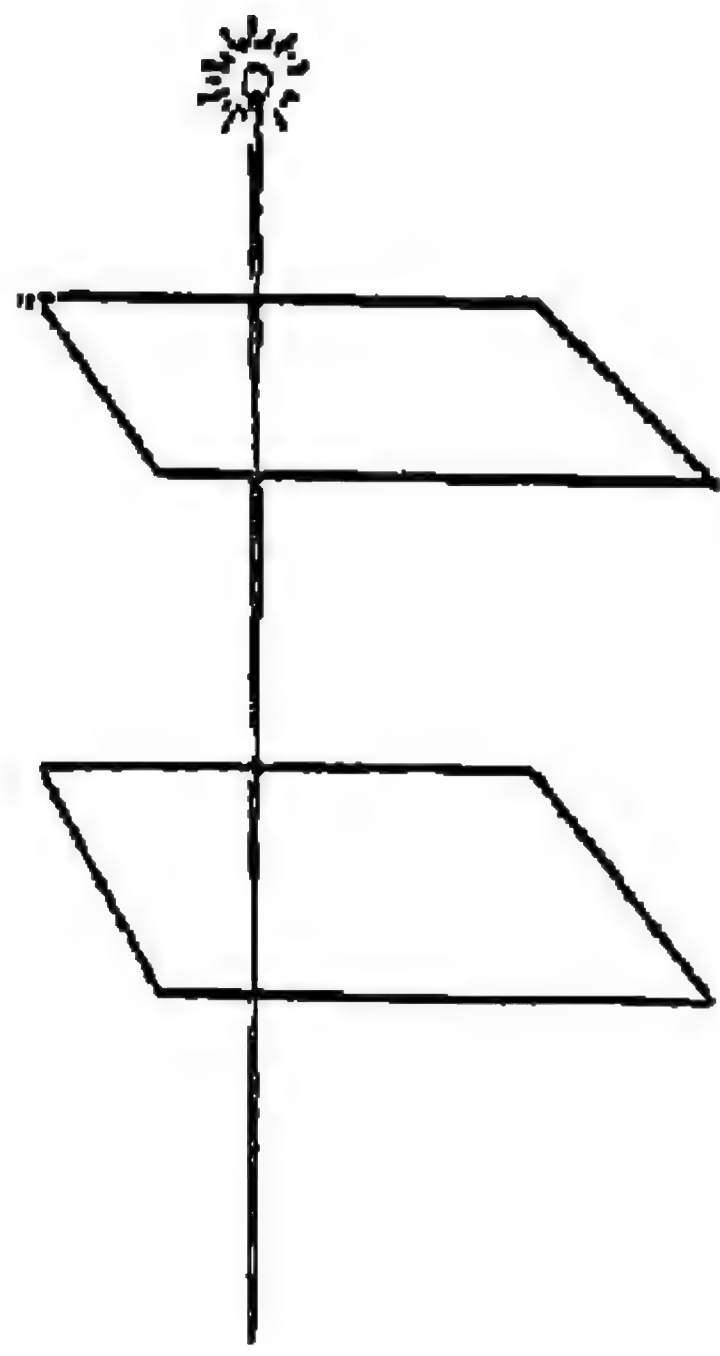
ولكن يجب ألا يعتقد القارىء أن قصة البحث عن نظرية للضوء قد انتهت . لم يكن حكم القرن التاسع عشر نهائياً ، فلا تزال مشكلة الحسم بين الجسيمات والموجات موجودة بأكملها أمام عالم الطبيعة الحديث ، والمشكلة الآن أكثر عمقاً وتداخلاً . فلنقبل هزيمة نظرية الجسيمات للضوء إلى أن نرى المشاكل التي تنتج عن انتصار النظرية الموجية .

هل موجات الضوء طويلة أم مستعرضة ؟

تؤيد جميع الظواهر البصرية التي تكلمنا عنها النظرية الموجية . وأقوى حجتين تؤيدان هذه النظرية هما انحناء الضوء حول العقبات الصغيرة وتفسير الانكسار . ولكن تبقى مشكلة أخرى لم تحل بعد ، ألا وهى تحديد الخواص الميكانيكية للأثير . ولحل هذه المشكلة يجب أن نعلم هل موجات الضوء في الأثير طويلة أم مستعرضة . ويمكن أيضاً وضع هذا السؤال كما يأتى : هل انتقال الضوء يماثل انتقال الصوت ؟

هل تحدث الموجة نتيجة لتغيرات في كثافة الوسط وبذلك تكون ذبذبات الجسيمات في اتجاه سير الضوء ؟ أم هل يشبه الأثير مادة غروية مرنة وبذلك لا تنشأ فيه إلا موجات مستعرضة وتسير جسيماته في اتجاه عمودي على اتجاه سير الموجة ؟ قبل دراسة هذه المسألة ، سنحاول أن نفكر في الحل المناسب الذي سنختاره . من الواضح أننا نكون أسعد حظاً لو كانت موجات الضوء طولية ، وذلك لأن صعوبات تكوين أثير ميكانيكي تكون أبسط في هذه الحالة . ومن الجازم جداً أن تكون الصورة التي ترسمها للأثير شبيهة بالصورة الميكانيكية للغازات وهي الصورة التي تفسر انتقال موجات الصوت . وتخيّل وجود موجات مستعرضة في الأثير أصعب من ذلك بكثير . وليس من البهل تكوين صورة لمادة غروية مكونة من جسيمات بحيث تنشأ عنها موجات مستعرضة . وكان هيجنز يميل إلى الاعتقاد بأن الأثير يشبه « الهواء » أكثر من « الغراء » ، ولكن الطبيعة لا تهتم كثيراً بما نطلبه ونحدده . هل أشفقت الطبيعة في هذه الحالة بعلماء الطبيعة الذين يحاولون فهم جميع الأحداث من وجهة نظر ميكانيكية ؟ للإجابة على هذا السؤال تلزم دراسة تجارب جديدة .

سندرس بالتفصيل تجربة واحدة فقط من بين التجارب الكثيرة التي تستطيع أن تجيبنا على هذا السؤال . نفرض أن لدينا لوحاً رفيع جداً من التورمالين المتبلور ومقطوع بشكل معين لا داعي لوصفه هنا . يجب أن يكون اللوح المتبلور رفيعاً لتمكن من رؤية الضوء خلاله . خذ الآن لوحين من هذا النوع وضعهما بين العينين وبين الضوء . ماذا ننتظر أن ترى ؟ مرة أخرى نقطة ضوئية إذا كان اللوح رفيعاً بدرجة كافية . في أغلب الأحيان تحقق التجربة ما ننتظره ، أي أننا نرى النقطة الضوئية خلال البلورتين . نغير بعد ذلك وضع إحدى البلورتين بإدارتها . وطبعاً لا يتحدد معنى هذه العبارة إلا إذا عين محور الدوران . سنأخذ الشعاع الساقط محوراً للدوران . ويكون معنى الدوران أننا نغير موضع نقط البلورة ما عدا النقط الواقعة على المحور . يحدث شيء غريب ! يخفت الضوء



تدرجياً إلى أن يتلاشى في النهاية ، ثم يظهر ثانية إذا استمر الدوران ونستعيد المنظر الأول عندما نصل إلى الوضع الابتدائي . يمكننا أن نسأل السؤال الآتي دون أن ندخل في تفاصيل هذه التجربة وما يشابهها من التجارب : هل يمكن تفسير هذه الظواهر إذا كانت موجات الضوء طولية ؟ في حالة الموجات الطولية تتحرك جسيمات الأثير في اتجاه المحور، مثلها في ذلك مثل الشعاع . إذا أديرنا البلورة حول المحور لا يتغير أى شيء على هذا المحور . النقط

الموجودة على المحور لا تتحرك ولا يعاني الجوار المباشر للمحور إلا إزاحة صغيرة جداً . وإذن في حالة الموجة الطولية ، لا يمكن أن يحدث تغيير واضح مثل اختفاء وظهور الصورة . ويمكن تفسير هذه الظاهرة ومثيلاتها من الظواهر الأخرى إذا فرضنا أن موجات الضوء مستعرضة وليست طولية ! أى إذا فرضنا أن للأثير صفة المواد الغروية .

وهذا أمر يؤسف له ، ويجب أن نستعد لمواجهة صعوبات كبيرة في محاولتنا وصف الأثير ميكانيكياً .

الأثير ووجهة النظر الميكانيكية :

إن دراسة جميع محاولات فهم الخواص الميكانيكية للأثير كوسط يمر الضوء فيه تحتاج إلى وقت طويل . ومعنى التركيب الميكانيكي كما نعلم هو أن الشيء المادى يتكون من جسيمات تؤثر في الخطوط الواصلة بينها قوى تتوقف على البعد فقط . ولكي يوضع تصميم للأثير كشيء مادى شبيه بالفراء ، كان على علماء الطبيعة أن يفرضوا فروضاً جد مفتعلة وغير طبيعية . ولن نذكر هذه الفروض هنا فهي تنسب إلى الماضي البعيد . ولكن النتيجة كانت هامة وذات مغزى . . . لقد كانت الصفات الغريبة لجميع هذه الفروض وضرورة الأخذ بكثير منها كل مستقل عن الآخر ، كافياً لزعزعة الاعتقاد في وجهة النظر الميكانيكية .

ولكن هناك اعتراضات أخرى ضد الأثير أبسط من صعوبة تكوينه . يتحتم أن يوجد الأثير في كل مكان إذا كنا نريد تفسير الظواهر البصرية ميكانيكياً . وإذا كان الضوء لا يسير إلا في وسط فإنه لا يوجد في أى فراغ خالى . ولكننا نعلم من الميكانيكا أن الفراغ الموجود بين المجموعة الشمسية لا يقاوم حركة الأجسام المادية . فمثلاً تتحرك الكواكب خلال الأثير الفروى دون أن تصادف مقاومة على خلاف ما يحدث عندما تتحرك في أى وسط مادي آخر . وإذا كانت الأثير لا يقاوم حركة المادة فإننا نستنتج أنه لا يوجد تفاعل بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة . يمر الضوء خلال الأثير كما يمر خلال الزجاج والماء ، ولكن سرعته تتغير في المادتين الأخيرتين ؛ فكيف يمكن تفسير هذه الحقيقة ميكانيكياً ؟ من الواضح أنه لا يمكن تفسيرها إلا بفرض وجود تفاعل ما بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة . ولكننا رأينا منذ برهة ، أنه في حالة حركة الحرة يجب أن نفترض عدم وجود مثل هذا التفاعل . أى أنه يوجد تفاعل بين الأثير والمادة في الظواهر الضوئية ولا يوجد أى تفاعل بينهما في الظواهر الميكانيكية ؛ ومن المؤكد أن هذه نتيجة تناقض نفسها .

يبدو أن هناك طريقاً واحداً للخلاص من هذه الصعوبات . في جميع مراحل تطور العلم حتى القرن العشرين ، نجد أنه لمحاولة فهم ظواهر الطبيعة على أساس ميكانيكى لا بد من إدخال كثير من المواد المصطنعة وغير الواقعية مثل الموائع الكهربائية والمغناطيسية وجسيمات الضوء والأثير . ونتيجة لهذا تتركز جميع الصعوبات في عدد قليل من النقاط الأساسية ، مثل الأثير في حالة الظواهر الضوئية ، إذ يبدو هنا أن جميع المحاولات غير المثمرة لتفسير الأثير تفسيراً بسيطاً وكذلك الاعتراضات الأخرى تشير إلى أن الخطأ ناشئ عن الفرض الأساسى بإمكان تفسير جميع أحداث الطبيعة من وجهة النظر الميكانيكية . ولم ينجح العلم في إتمام البرنامج الميكانيكى بطريقة مرضية ، ولا يوجد الآن عالم من علماء الطبيعة يعتقد بإمكان إتمامه .

في استعراضنا للأفكار الطبيعية الأساسية قابلتنا بعض المشاكل التى لم نحل ، وصعوبات وعقبات ثبّطت همتنا في محاولة تكوين صورة منتظمة متماسكة

لظواهر العالم الخارجى . فمثلا فى الميكانيكا الكلاسيكية ، كان هناك الدليل الذى لم يلاحظ وهو تساوى كتلتى القصور الذاتى والجاذبية ، كما كانت هناك الصفة المصطنعة للموائع الكهربائية والمغناطيسية ، والقوة التى تؤثر بين التيار الكهربائى والإبرة المغناطيسية وهى صعوبات لم تحل ، ويذكر القارىء أن هذه القوة لم تؤثر فى الخط الواصل بين السلك والقطب المغناطيسى وأنها كانت تتوقف على سرعة الشحنة المتحركة . وكان القانون الذى يعبر عن قيمتها واتجاهها معقداً للغاية . وأخيراً كانت هناك عقبة الأثير الكبرى .

لقد هاجم علم الطبيعة الحديث جميع هذه المشاكل وحلها . ولكن أثناء صراعه لحلها ، نشأت مشاكل جديدة وعويصة . فكما أن معلوماتنا الآن أوسع وأشمل من معلومات علماء الطبيعة فى القرن التاسع عشر فإن صعوباتنا وشكوكنا أكثر .

تلخيص :

نلاحظ فى نظرية الموائع الكهربائية القديمة وفى نظرية الجسيمات والنظرية الموجية محاولات أخرى لتطبيق وجهة النظر الميكانيكية . ولكننا نقابل صعوبات شديدة فى تطبيق وجهة النظر الميكانيكية للظواهر الكهربائية والبصرية . إذا أثرت شحنة متحركة على إبرة مغناطيسية فإن القوة بدلاً من أن تتوقف على البعد فقط تعتمد أيضاً على سرعة الشحنة . والقوة ليست جاذبة ولا طاردة وإنما تؤثر فى اتجاه عمودى على الخط الواصل بين الشحنة والإبرة .

فى علم البصريات يجب علينا أن نقرر تفضيل النظرية الموجية على نظرية الجسيمات للصوء . من المؤكد أن فكرة انتشار الموجات فى وسط يتكون من جسيمات تؤثر بينها قوى هى فكرة ميكانيكية . ولكن ماهو الوسط الذى ينتشر فيه الضوء وماهى خواصه الميكانيكية ؟ ليس هناك أى أمل فى اختصار الظواهر الضوئية إلى ظواهر ميكانيكية دون الإجابة على هذا السؤال . ولكن صعوبات الإجابة على هذا السؤال عظيمة جداً ولذلك سنضطر إلى تركه وترك وجهة النظر الميكانيكية أيضاً .

الباب الثالث

المجال — النسبية

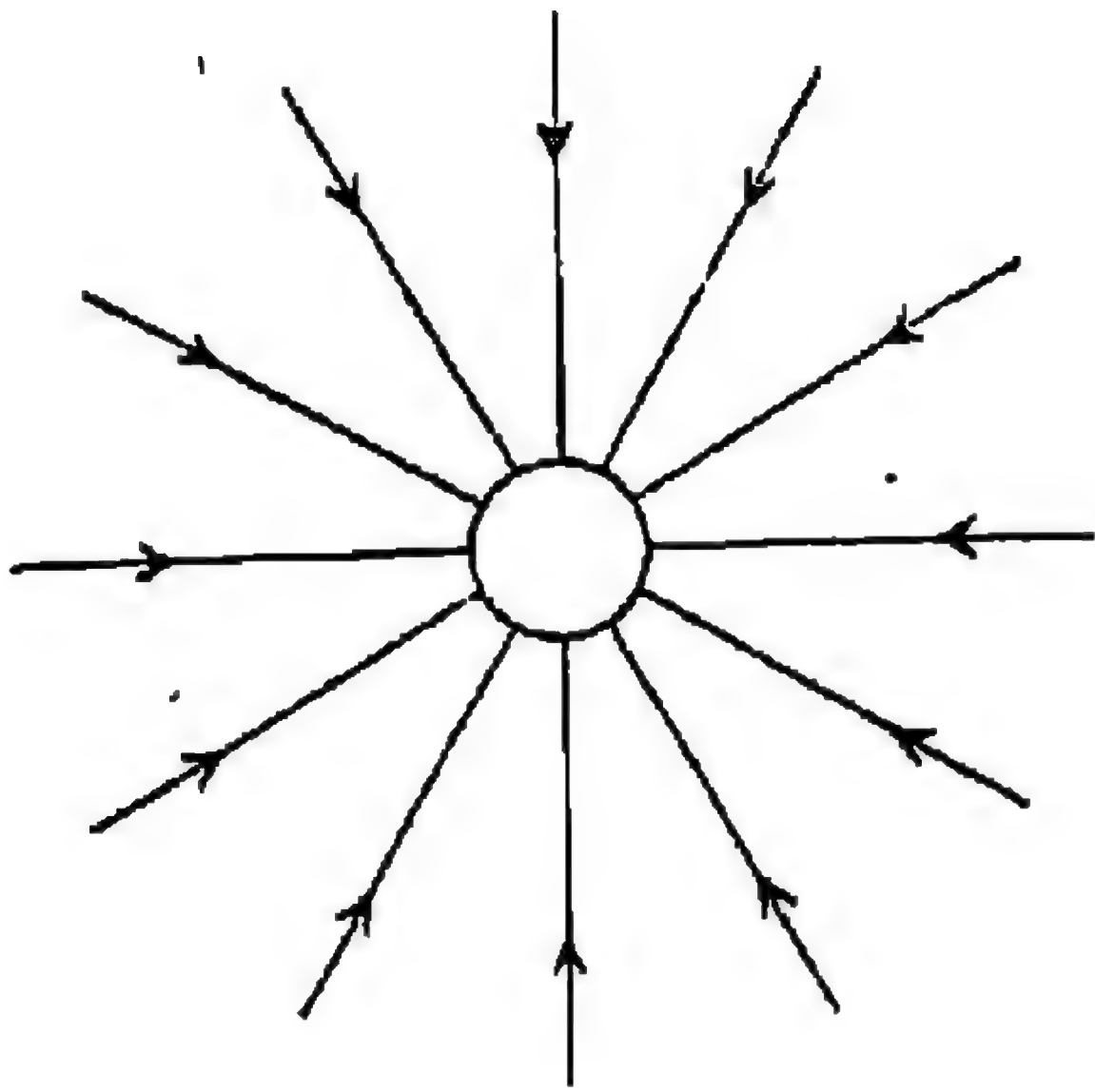
[المجال كوسيلة لتمثيل الواقع — دعائنا نظرية المجال — واقعية المجال — المجال والأثير — السقالة الميكانيكية — الأثير والحركة — الزمن والمسافة والنسبية — نظرية النسبية والميكانيكا — متصل الزمان والمكان — النسبية العامة — خارج وداخل المصعد — الهندسة والتجربة — النسبية العامة وتحقيقها — المجال والمادة] .

المجال كوسيلة لتمثيل الواقع :

لقد أدخلت أفكار جديدة وثورية في علم الطبيعة خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر . وقد مهدت هذه الأفكار الطريق إلى اتجاه فلسفي جديد يختلف عن وجهة النظر الميكانيكية . ولقد ولدت مبادئ جديدة نتيجة لأبحاث فاراداي ومكسويل وهرتز وكونت هذه المبادئ صورة جديدة للحقيقة .

ومهمتنا الآن هي وصف الأثر الذي أحدثته هذه المبادئ الجديدة في العلم ، وأن نبين كيف قويت واتضحت هذه المبادئ . وسنحاول شرح تطور هذه الأفكار بطريقة منطقية دون أن نهتم كثيراً بالترتيب التاريخي .

لقد نشأت المبادئ الجديدة عن الظواهر الكهربائية ولكن من الأبسط أن ندخلها عن طريق الميكانيكا . إذا كان لدينا جسيان فإننا نعلم أنهما يجذبان بعضهما وأن قوة الجذب هذه تتناسب عكسياً مع مربع البعد . يمكننا تمثيل هذه الحقيقة بطريقة جديدة ، وسنفعل ذلك رغم صعوبة فهم مميزات ذلك . تمثل الدائرة الصغيرة في الرسم جسماً جاذباً ، الشمس مثلاً . والواقع أن هذه المجموعة هي مجموعة فراغية وليست رسماً في مستو . فالدائرة الصغيرة تمثل كرة في الفراغ الشمسي مثلاً .



إذا وجد جسم (يسمى جسم اختبار)
في جوار الشمس فإنه ينجذب لها
بقوة خط عملها هو الخط الواصل بين
مركزى الجسمين . وعلى ذلك تمثل
الخطوط الموجودة في الرسم اتجاه قوة
جذب الشمس لأوضاع جسم الاختبار
المختلفة . ويبين السهم الموجود على

كل خط أن القوة متجهة نحو الشمس . تسمى هذه المستقيمات خطوط قوة مجال
الجاذبية ، وسنعتبر هذا في الوقت الحاضر إسماً ولا داعي لبحث هذه التسمية
الآن . وتوجد خاصية مميزة للرسم السابق سنوضح أهميتها فيما بعد وهي أن
جميع خطوط القوة موجودة في الفراغ حيث لا توجد مادة . ومؤقتاً تبين جميع
خطوط القوة أو المجال كيف يسلك جسم الاختبار إذا اقترب فقط من الكرة
(صاحبة المجال) .

في هذا التمثيل الفراغي ، جميع الخطوط عمودية على سطح الكرة . وحيث أنها
جميعاً تتفرق من نقطة واحدة ، فإنها تكون كثيفة بالقرب من الكرة ويقل
تكاثرها كلما زاد البعد عن الكرة . وإذا ازداد البعد عن الكرة إلى ضعفه أو ثلاثة
أمثاله فإن تكاثف الخطوط في التمثيل الفراغي (رغم عدم صحة ذلك في الشكل
المستوى) يقل إلى الربع أو التسع على التوالي . أى أن هذه الخطوط تؤدي
غرضين . فهي تبين اتجاه القوة المؤثرة على الجسم الموجود في جوار الكرة التي
تمثل الشمس ، كما أن تكاثف هذه الخطوط في الفراغ يبين العلاقة بين القوى والبعد .
وإذا فسر المجال تفسيراً صحيحاً فإنه يمثل اتجاه قوة الجاذبية وعلاقتها بالبعد .
ويمكن للإنسان أن يقرأ قانون الجاذبية من مثل هذا الرسم كما يقرأه من الوصف
بالكلام أو بلغة الرياضة المضبوطة الاقتصادية . قد يكون التمثيل بالمجال واضحاً وذا
أهمية ، ولكن لا يوجد أى سبب يجعلنا نعتقد أنه يدل على أى تقدم حقيقي . ومن
الصعب جداً لإثبات فائدة هذا التمثيل في حالة الجاذبية . وقد يجد البعض أنه من

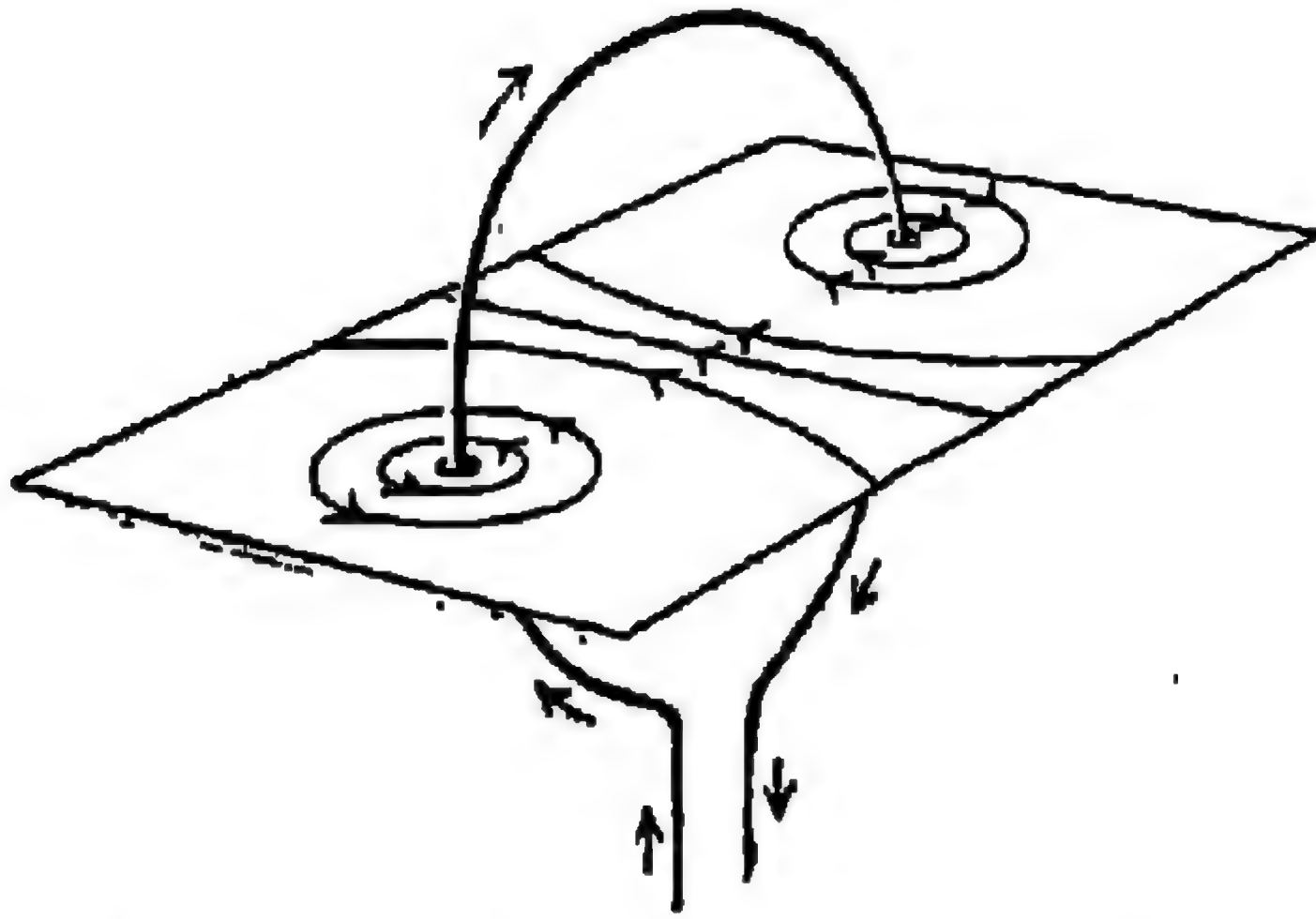
المفيد عدم اعتبار هذه الخطوط على أنها رسوم فقط وأن يتخيلوا التأثير الحقيقي للقوى التي تعمل فيها . يمكن القيام بذلك ولكن يتحتم الفرض بأن التأثير في هذه الخطوط له سرعة لانهائية . فحسب قانون نيوتن لا تتوقف القوة إلا على البعد فقط ولا علاقة لها بالزمن . أى أن القوة يجب ألا تحتاج إلى وقت لتصل من جسم لآخر . ولكن حيث أن الحركة بسرعة لانهائية لا تعنى أى شىء بالنسبة إلى شخص مدرك فإن محاولة اعتبار الرسم السابق شيئاً أكثر من نموذج لا تؤدي إلى شىء بالمرّة .

ونحن لا نريد بحث مسألة الجاذبية الآن . وهى فقط مقدمة تبسط شرح الطرق الماثلة في نظرية الكهرباء .

سنبدأ بدراسة التجربة التي ولدت صعوبات جدية في تفسيرنا الميكانيكي . كان لدينا تيار ينساب في سلك دائري حول إبرة مغناطيسية في مركز السلك . وفي اللحظة التي بدأ التيار فيها في الانسياب ، ظهرت قوة جديدة تؤثر على القطب المغناطيسي وعمودية على جميع الخطوط الواصلة بين السلك والقطب وفي الحالة التي نشأت فيها هذه القوة عن الحركة الدائرية لشحنة كهربائية ، بينت تجربة رولاند أن القوة تتوقف على سرعة الشحنة . هذه الحقائق التي حصل عليها بالتجربة تناقض وجهة النظر الفلسفية التي تقول أن القوة لا بد . وأن تؤثر في الخط الواصل بين الجسمين وأنها تتوقف على البعد بينهما فقط .

إن التعبير المضبوط الذي يمثل القوة التي يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسي معقد للغاية ، والتعبير الناظر في حالة الجاذبية أبسط منه بكثير . ومع ذلك فيمكننا محاولة النظر إلى الموضوع كما فعلنا في حالة قوة الجاذبية تماماً . والسؤال الذي أمامنا الآن هو : ماهى القوة التي يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسي قريب منه ؟ من الصعب وصف هذه القوة بالكلام . وحتى الصيغة الرياضية تكون معقدة للغاية . وأفضل شىء هو تمثيل ما نعلمه عن القوى المؤثرة بالرسم أو بنموذج كلامي يحتوي على خطوط القوى . وتوجد صعوبة سببها أن القطب المغناطيسي لا يوجد إلا مع قطب مغناطيسي آخر في مزدوج مغناطيسي . ومع ذلك فيمكننا دائماً أن

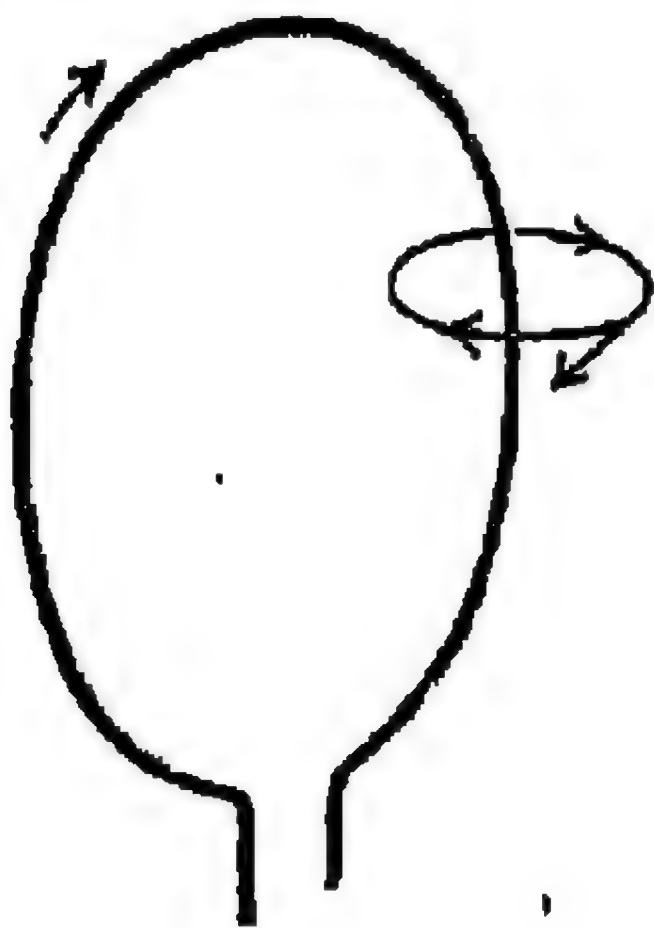
تصور أن الإبرة المغناطيسية طويلة بدرجة تجعلنا لا نأخذ في حسابنا إلا القوى المؤثرة على القطب القريب من التيار . ويكون القطب الثاني بعيداً بدرجة تمكننا من إهمال القوة المؤثرة عليه . ولتجاشي الالتباس سنفرض أن القطب المغناطيسي القريب من السلك هو القطب الموجب . يمكننا قراءة خواص القوة المؤثرة على القطب المغناطيسي الموجب من الرسم التالي .



أولاً نلاحظ سهمي بجوار السلك يبين اتجاه التيار من الجهد الأعلى إلى الجهد الأدنى . وجميع الخطوط الأخرى هي خطوط قوة تخص هذا التيار واقعه في مستو معين . وإذا رسمنا هذه الخطوط جيداً ، فإنها تدل على

اتجاه متجه القوة الذي يمثل تأثير التيار على قطب موجب معلوم ، كما تعطينا فكرة عن طول هذا المتجه . القوة هي متجه كما نعلم ، ولتعيين هذا المتجه يجب أن نعلم كلا من اتجاهه وطوله . والذي يهمنا أكثر من غيره هو اتجاه القوة المؤثرة على قطب . والسؤال الذي أمامنا هو كيف نعلم من الرسم اتجاه القوة المؤثرة على قطب عند أي نقطة في الفراغ .

والقاعدة التي نعين بها اتجاه القوة من مثل هذا النموذج ليست ببساطة مناظرتها في المثال السابق الذي كانت خطوط القوة فيه مستقيمة . الرسم التالي يبين خط قوة واحد وذلك لإيضاح القاعدة . يقع متجه القوة على المماس لخط القوة كما هو موضح .



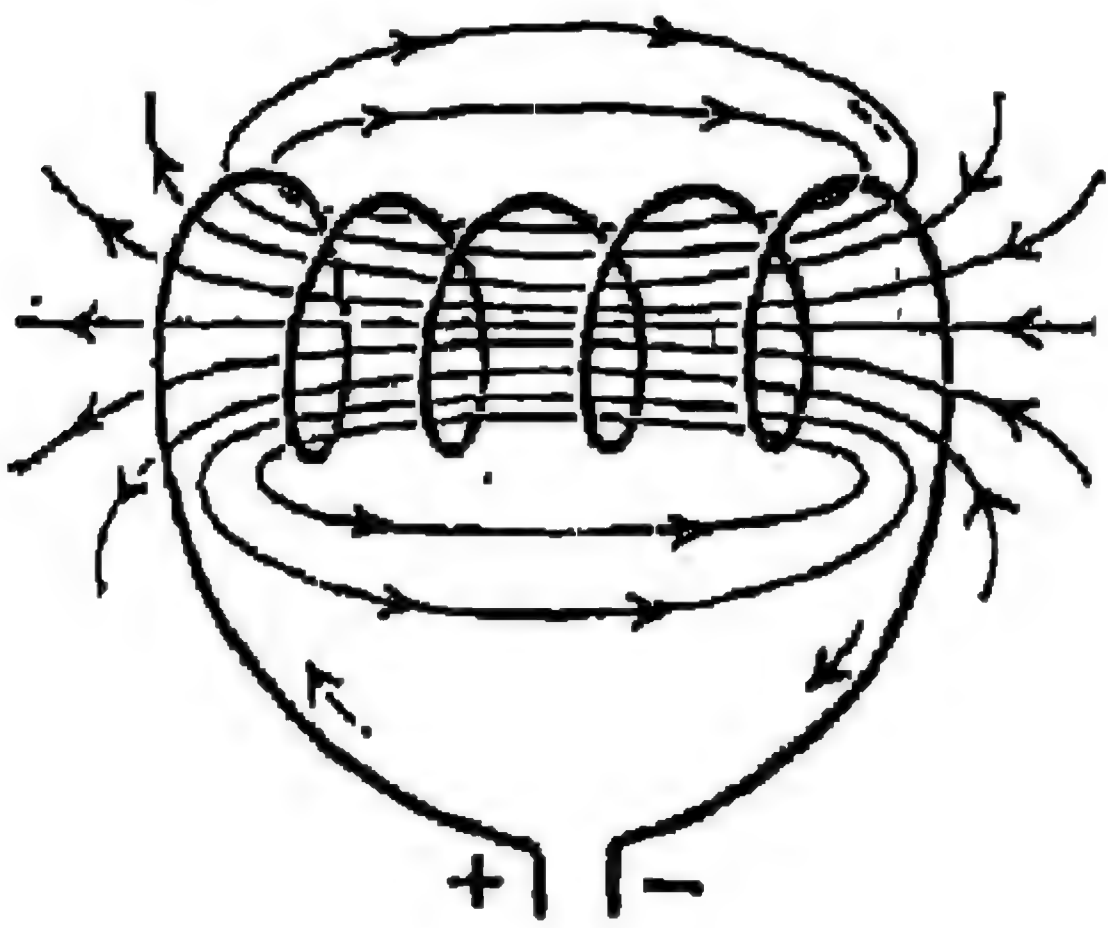
وسهم متجه القوة والأسهم الموجودة على خط القوة تشير جميعاً إلى نفس الاتجاه . أي أن هذا هو الاتجاه الذي تؤثر فيه القوة على القطب المغناطيسي عند هذه النقطة .

والرسم الجيد ، أو الانموذج المضبوط (وهذا تعبير أدق) يعطينا أيضاً فكرة عن طول متجه

القوة عند أى لحظة . يجب أن يكون هذا المتجه أطول عندما تكون خطوط القوة أكثف ، أى بالقرب من السلك ، وأقصر عندما تكون الخطوط أقل تكاثفاً أى بعيداً عن السلك .

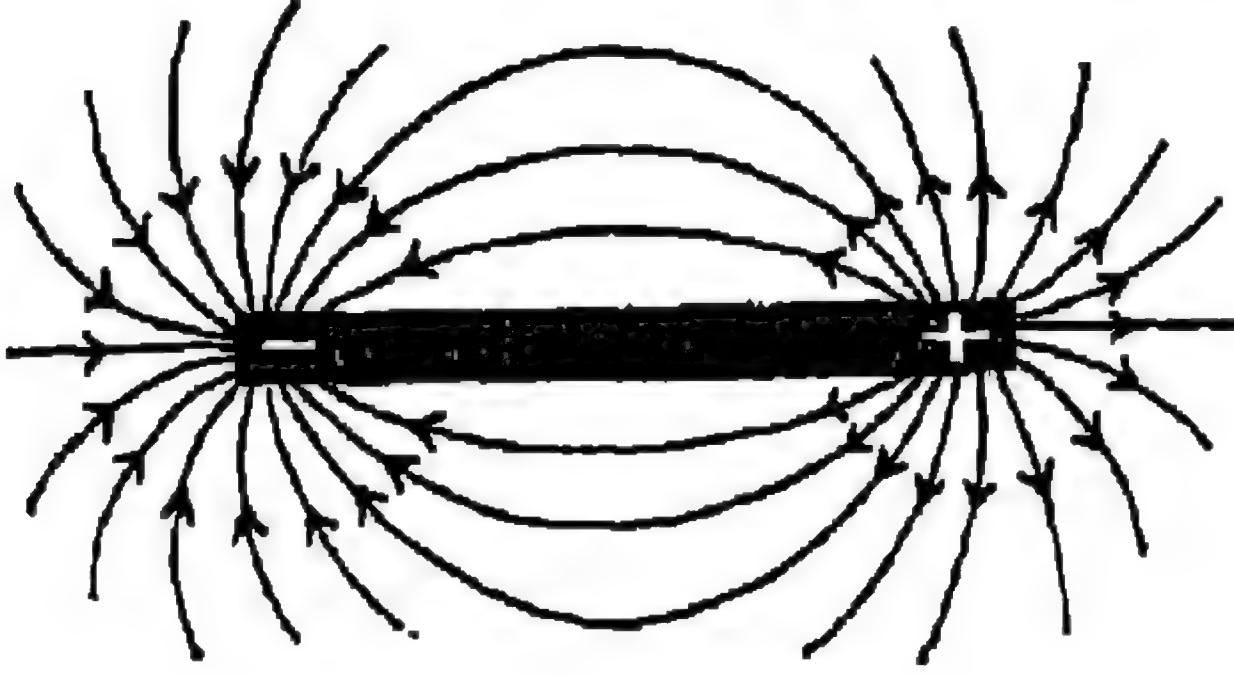
بهذه الطريقة ، تمكنا خطوط القوة أو المجال بعبارة أخرى ، من تعيين القوى المؤثرة على قطب مغناطيسى عند أى نقطة فى الفراغ . وفى الوقت الحالى يكون هذا هو المبرر الوحيد لهذا التصميم المتعب للمجال . وحيث أننا نعلم ماذا يمثل المجال ، فإننا سندرس خطوط القوة المناظرة للتيار دراسة أعمق . هذه الخطوط هى دوائر تحيط بالسلك وتقع فى المستوى العمودى على مستواه . وبقراءة خواص القوة من الرسم ترى مرة ثانية أن القوة تؤثر فى اتجاه عمودى على أى مستقيم واصل بين السلك والقطب . وذلك لأن المماس لدائرة يكون دائماً عمودى على نصف القطر . يمكن تلخيص كل ما نعلمه عن القوة المؤثرة فى نموذج المجال . ونحن نضيف فكرة المجال إلى فكرة التيار والقطب المغناطيسى ونستعين بها جميعاً لتمثيل القوة المؤثرة بطريقة بسيطة .

يوجد مجال مغناطيسى يناظر كل تيار ، أى تؤثر قوة على قطب مغناطيسى عند اقترابه من سلك ينساب فيه تيار . ونشير هنا إلى أن هذه الخاصية تمكنا من تصميم أجهزة حساسة تدل على وجود التيار أو عدم وجوده . بمجرد أن نعرف كيف نقرأ خواص القوى المغناطيسية من نموذج المجال لتيار ما ، سنرسم دائماً المجال المحيط بالسلك الذى ينساب فيه التيار وذلك لتمثيل تأثير القوى المغناطيسية عند أى نقطة فى الفراغ . ومثالنا الأول هى ما يسمى «الملف الحزوني» ، وهو ملف من السلك كما هو مبين فى الشكل ، وغرضنا هو أن نعلم بالتجربة كل ما يمكننا عن المجال



المغناطيسى الخاص بتيار ينساب فى ملف حلزوني وأن نجمع هذه المعلومات لعمل المجال . والرسم التالى يمثل النتيجة . خطوط القوى المنحنية مقفلة وتحيط بالملف الحزوني بالطريقة التى تميز المجال المغناطيسى للتيارات .

ويمكن عمل مجال قضيب مغناطيسي بنفس طريقة عمل مجال كهربائي .
والشكل التالي يبين ذلك . تتجه خطوط القوى من القطب الموجب إلى السالب



دائماً . ويقع متجه القوة على
المماس لخط القوة دائماً ويكون
أطول ما يمكن بالقرب من القطبين
وذلك لأن تكاثف خطوط
القوة يكون أكبر ما يمكن عند

هاتين النقطتين . يمثل متجه القوة تأثير المغناطيس على قطب مغناطيسي موجب .
في هذه الحالة ، ينشأ المجال عن المغناطيس لا عن التيار .

يجب أن نقارن الشكلين الأخيرين بدقة . في الشكل الأول يوجد المجال
المغناطيسي لتيار ينساب في ملف حلزوني ، وفي الثاني مجال قضيب مغناطيسي .
فلنهمل كلا من الملف الحلزوني والقضيب ونلاحظ المجالين الخارجين فقط . نلاحظ
على الفور أن كلا من المجالين له نفس الخواص تماماً . في كل من الحالتين تتجه
خطوط القوة من أحد طرفي الملف أو القضيب إلى الطرف الآخر .

هذه هي أولى ثمار تمثيل المجال ! فإنه ليصعب جداً ملاحظة تشابه قوى بين تيار
ينساب في ملف حلزوني وبين قضيب مغناطيسي إذا لم نقيم بعمل المجال .

يمكننا الآن اختبار فكرة المجال اختباراً أقسى من ذلك بكثير . سنرى في
القريب العاجل ما إذا كانت هذه الفكرة تمثيلاً جديداً للقوى المؤثرة أم أنها تعني
شيئاً آخر فضلاً عن ذلك . يمكننا أن نستعمل المنطق الآتي : افرض مؤقتاً أن المجال
يميز جميع الأحداث التي تحددها مصادره بطريقة وحيدة . وليس هذا إلا تخميناً ، وهو
يعني أنه إذا كان لكل من الملف الحلزوني والقضيب نفس المجال ، فإن جميع تأثيراتهما
تكون واحدة ، أيضاً . ويكون معنى ذلك أن خواص ملفين حلزونين يحملان
تيارين كهربائيين هي نفس خواص قضيب مغناطيسين وأنهما يتجاذبان أو يتنافران
على حسب وضعهما النسبي كما في حالة القضيبين . وهذا يعني أيضاً أن قضيباً
مغناطيسياً وملفاً حلزونياً يتجاذبان أو يتنافران بنفس الطريقة التي يجذب أو يتنافر بها

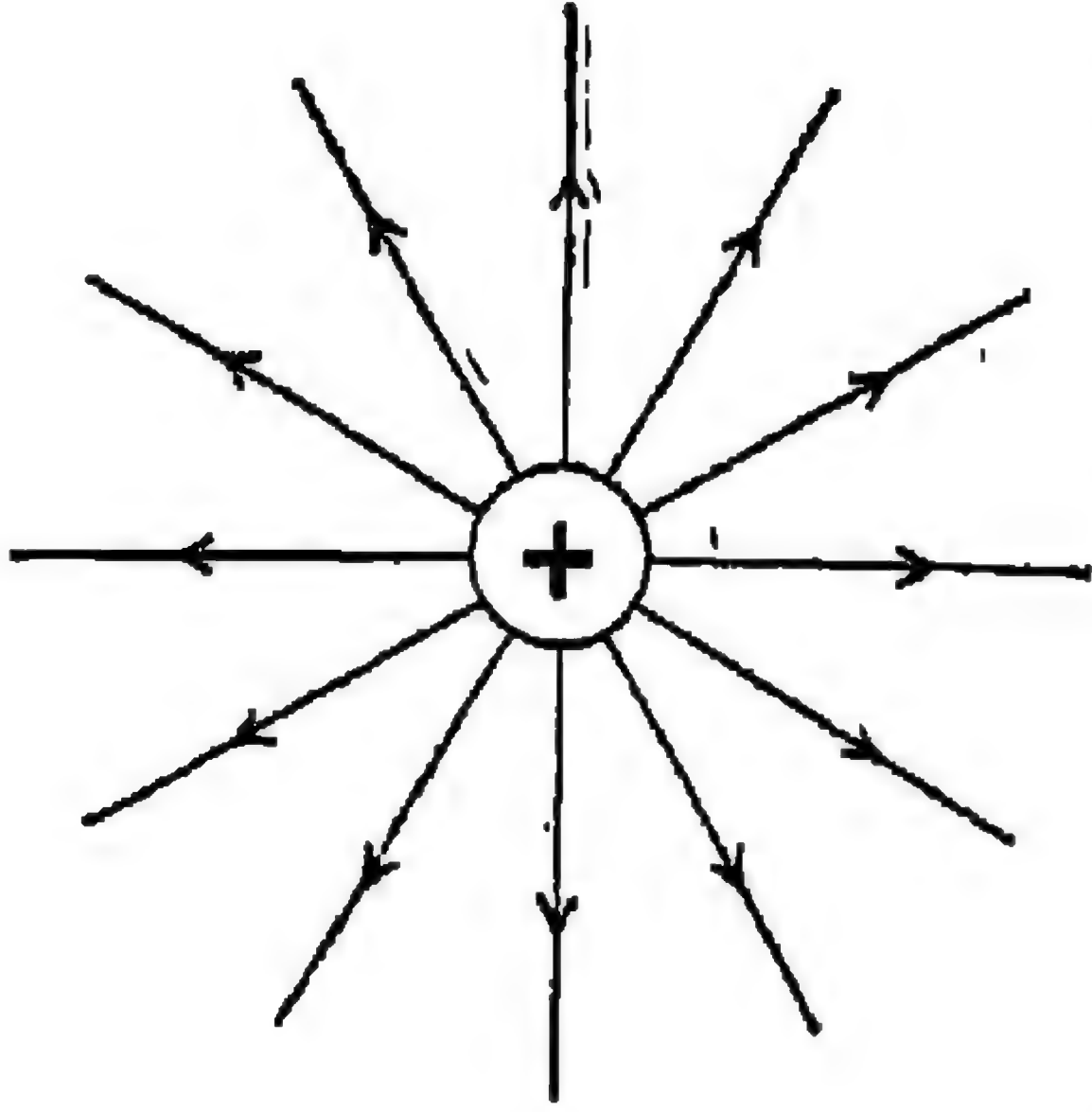
قضيبان مغناطيسيان . وبالاختصار يكون معنى ماسبق أن جميع تأثيرات ملف حلزوني يمر فيه تيار هي نفس تأثيرات مغناطيس مناظر وذلك لأن المجال وحده هو المسئول عن هذه التأثيرات والمجال في كل من الحالتين له نفس الخواص . والتجربة تحقق تخميناتنا تماما !

يستطيع القارئ أن يتخيل صعوبة الحصول على هذه الحقائق بدون فكرة المجال ! أن تعبير القوة المؤثرة بين سلك ينساب فيه تيار وبين قطب مغناطيسي معقد للغاية . وفي حالة ملفين حلزونيين يجب علينا دراسة القوى التي يؤثر بها تياران كل على الآخر . ولكن إذا قمنا بذلك مع الاستعانة بالمجال فإننا نلاحظ فوراً خواص هذه التأثيرات بمجرد أن نتحقق من تشابه مجال الملف الحلزوني ومجال القضيب المغناطيسي .

من حقنا الآن أن نعتبر المجال شيئاً آخر يزيد عن فكرتنا الأولى عنه . ويبدو لنا أن خواص المجال وحده هي التي تهتم في وصف الظواهر ، أما اختلاف مصدر المجال فلا يهم . وتظهر أهمية فكرة المجال عندما تؤدي إلى حقائق عملية جديدة . لقد أثبتت فكرة المجال فائدتها الكبيرة . وقد بدأت هذه الفكرة كشيء يوجد بين المصدر والإبرة المغناطيسية لوصف القوة المؤثرة وكان ينظر للمجال على أنه وكيل للتيار تحدث جميع تأثيرات التيار عن طريقه . ولكن يقوم الآن هذا الوكيل بدور المترجم الذي يترجم القوانين إلى لغة بسيطة واضحة يسهل فهمها .

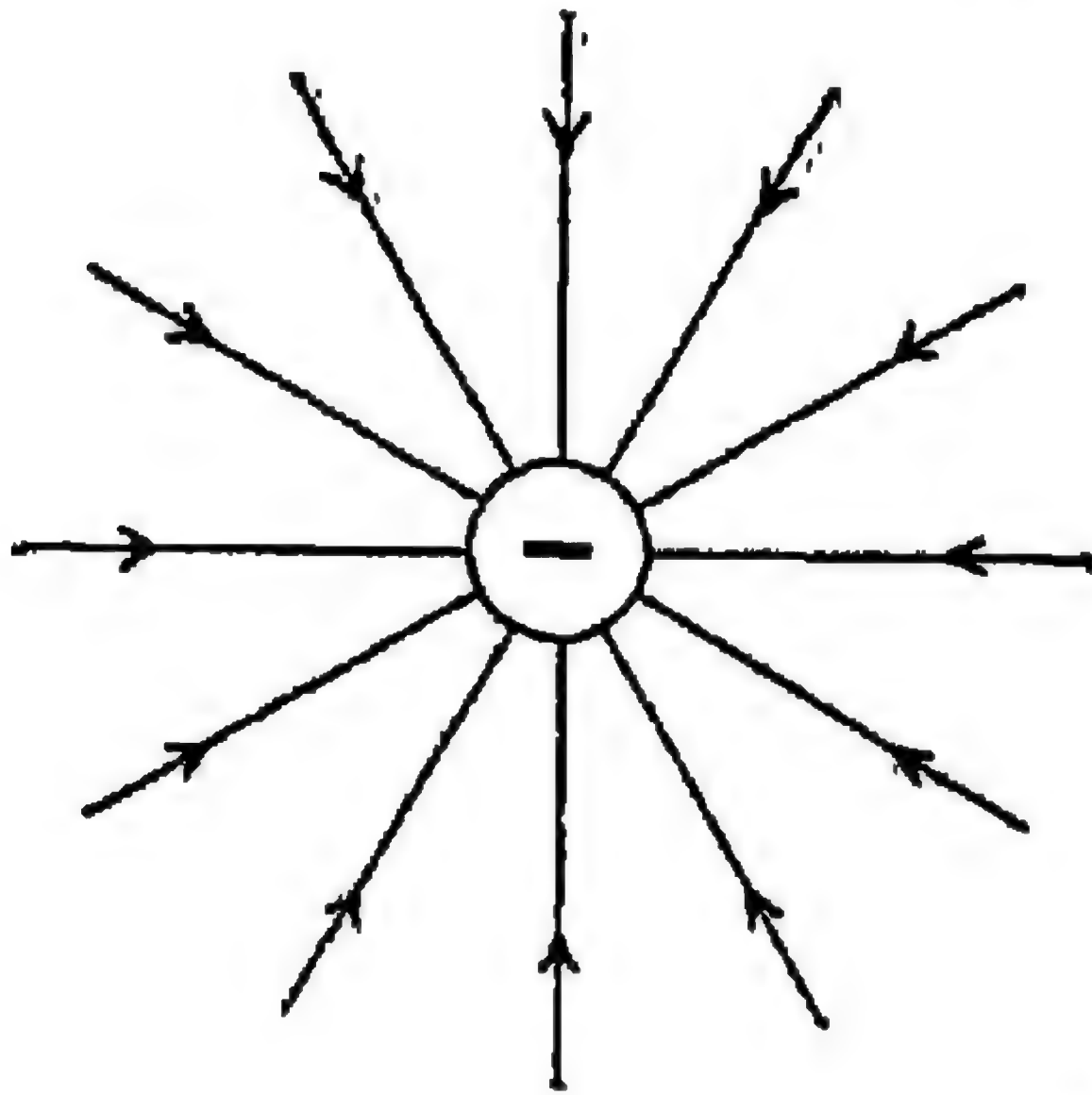
إن النجاح الأول للتمثيل بالمجال يجعلنا نظن أن من المناسب دراسة جميع تأثيرات التيارات والمغناطيسات والشحنات بطريقة غير مباشرة ، أي بمساعدة المجال كفسر .

ويمكن اعتبار المجال كشيء يصاحب التيار دائماً ، فالمجال يوجد رغم عدم وجود قطب مغناطيسي نختبر به وجوده (أي المجال) . فلنحاول تتبع هذا الدليل الجديد باستمرار .



ويمكن دراسة مجال موصل مشحون
بنفس الطريقة التي درسنا بها مجال
الجاذبية أو مجال التيار أو المغناطيس
ومرة أخرى نجد أبسط الأمثلة لعمل
مجال كرة مشحونة يجب أن نعلم أي
نوع من القوى يؤثر على جسم اختبار
صغير موجب الشحنة عند اقترابه من

مصدر المجال أي من الكرة المشحونة . واختيار جسم اختبار موجب الشحنة
لا سالبها هو مسألة اتفاق فقط لتحديد اتجاه الأسهم الموجودة على خطوط القوة .
والنموذج في هذه الحالة يشابه مجال الجاذبية (ص ٩٠) وذلك لتشابه قانوني كولوم
ونيوتن ، والفرق الوحيد بين هذين النموذجين هو أن الأسهم تشير في اتجاهين
متضادين . وفي الواقع نعلم أن شحنتين موجبتين تتنافران وأن كتلتين تتجاذبان .
ومع ذلك فإن مجال كرة سالبة الشحنة يكون مطابقاً لمجال الجاذبية وذلك لأن جسم
الاختبار الصغير الموجب الشحنة سيجذب إلى مصدر المجال .



إذا كان لدينا قطبان ساكنان
أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي
فإنه لا توجد قوة جذب أو طرد بينهما
ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة بلغة
المجال كما يأتي : المجال الكهربائي
الاستاتيكي لا يؤثر على المجال المغناطيسي
وبالعكس . والمجال الكهربائي

الاستاتيكي هو المجال الكهربائي الذي لا يتغير بمرور الزمن . تبقى المغناطيسات
والشحنات ساكنة بجانب بعضها أية فترة زمنية إذا لم تؤثر عليها قوة خارجية .
كل من المجال الكهربائي والمغناطيسي ومجال الجاذبية يختلف تماماً عن الآخرين
ولا تتميز هذه المجالات ويحتفظ كل منها بذاته ولا يتأثر بالآخرين .

لنعود الآن إلى الكرة الكهربائية التي بقيت حتى الآن ساكنة . نفرض أن هذه الكرة بدأت تتحرك نتيجة لتأثير قوة خارجية . تتحرك الكرة المشحونة . بلعة المجال تقرأ الجملة السابقة كما يأتي : يتغير مجال الكرة المشحونة بتغير الزمن . ولكننا نعلم من تجربة رولاند أن حركة هذه الكرة المشحونة تكافئ تياراً كهربائياً . وأيضاً نعلم أن مجالاً مغناطيسياً يصاحب كل تيار . وعلى ذلك تكون لدينا السلسلة الآتية :

حركة شحنة \Rightarrow تغير في مجال كهربائي .



تيار \Leftarrow المجال المغناطيسي المصاحب .

وعلى ذلك نستنتج أن : التغير في المجال الكهربائي الناتج عن حركة الشحنة يصطحب دائماً بمجال مغناطيسي .

تعتمد هذه النتيجة على تجربة أورستد ولكنها تشمل أكثر من ذلك . فهذه النتيجة تحوى الاعتراف بأن مصاحبة مجال مغناطيسي لمجال كهربائي يتغير مع الزمن حقيقة أساسية لدراستنا القادمة .

إذا ما ظلت شحنة ما ساكنة فإنه لا يوجد سوى مجال الكهروستاتيكي ولكن يظهر مجال مغناطيسي بمجرد أن تبدأ الشحنة في الحركة . ويمكننا أن نذهب إلى أبعد من ذلك . يكون المجال المغناطيسي الذي تولده حركة الشحنة أشد إذا كانت الشحنة أكبر وإذا تحركت أسرع . هذه الحقيقة هي أيضاً نتيجة لتجربة رولاند . مرة أخرى باستعمال لغة المجال يمكننا أن نقول : كلما كان تغير المجال الكهربائي أسرع كلما كان المجال المغناطيسي المصاحب أشد .

لقد حاولنا هنا ترجمة بعض الحقائق المعروفة من لغة الموائع التي نشأت من وجهة النظر الميكانيكية القديمة إلى لغة المجالات الجديدة . وسنرى فيما بعد وضوح وبعد مدى لغتنا الجديدة .

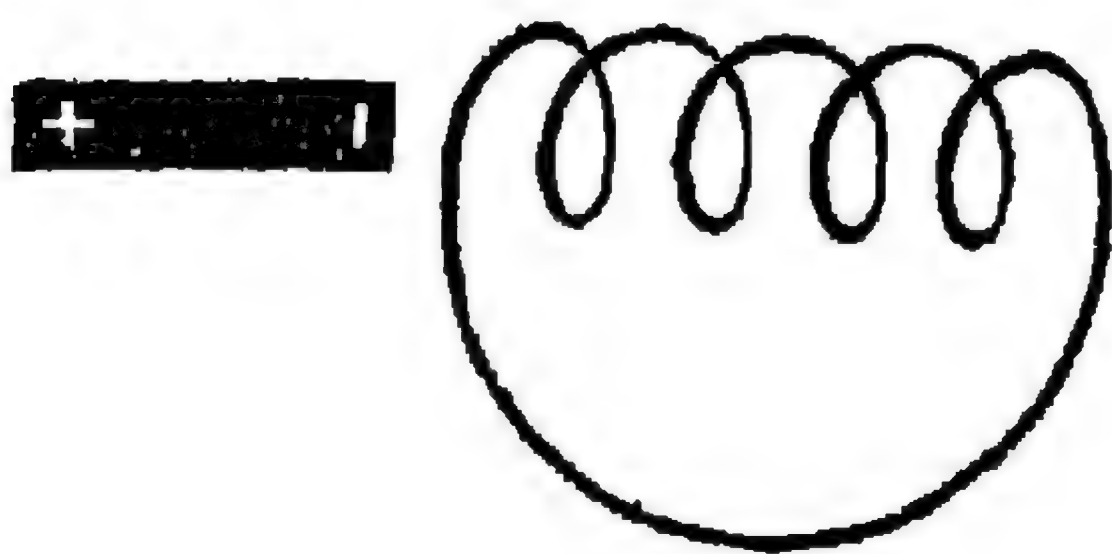
وعامة نظرية المجال :

« يصاحب تغير المجال الكهربائي مجال مغناطيسي » . إذا بادلنا كلمتي كهربائي ومغناطيسي كلا محل الأخرى فإن الجملة السابقة تصبح : « يصاحب تغير المجال المغناطيسي مجال كهربائي » . لا يمكن الجزم بصحة أو خطأ هذه العبارة إلا عملياً بالتجربة ولكن لغة المجال هي التي تعطينا فكرة صياغة هذه المسألة .

منذ أكثر من مائة عام بقليل أجرى فارادى تجربة نتج عنها الاكتشاف العظيم للتيارات المنتجة بالتأثير .

والتجربة بسيطة للغاية . نحتاج فقط إلى ملف حلزوني أو أية دائرة كهربائية أخرى ، وقضيب مغناطيس وأحد الأجهزة التي تدلنا على وجود التيار . عند الابتداء يكون القضيب المغناطيسي ساكناً بالقرب من الملف الحلزوني الذي يكون دائرة مقفلة . لا يمر أى تيار فى السلك وذلك لعدم وجود مصدر له . يوجد مجال للمغناطيس الساكن وهو مجال لا يتغير بمرور الزمن . وفجأة يغير وضع المغناطيس إما بإبعاده كلية أو بتقريبه من الملف الحلزوني ، وذلك حسب رغبتنا . فى هذه اللحظة يظهر تيار لفترة زمنية قصيرة جداً ، ثم يتلاشى بعد ذلك . ويظهر

التيار كلما تغير موضع المغناطيس ، ويمكن التحقق من وجود التيار بواسطة جهاز حساس . ولكن التيار حسب نظرية المجال يعنى وجود مجال كهربائي يعمل على انسياب المائعين الكهربائيين

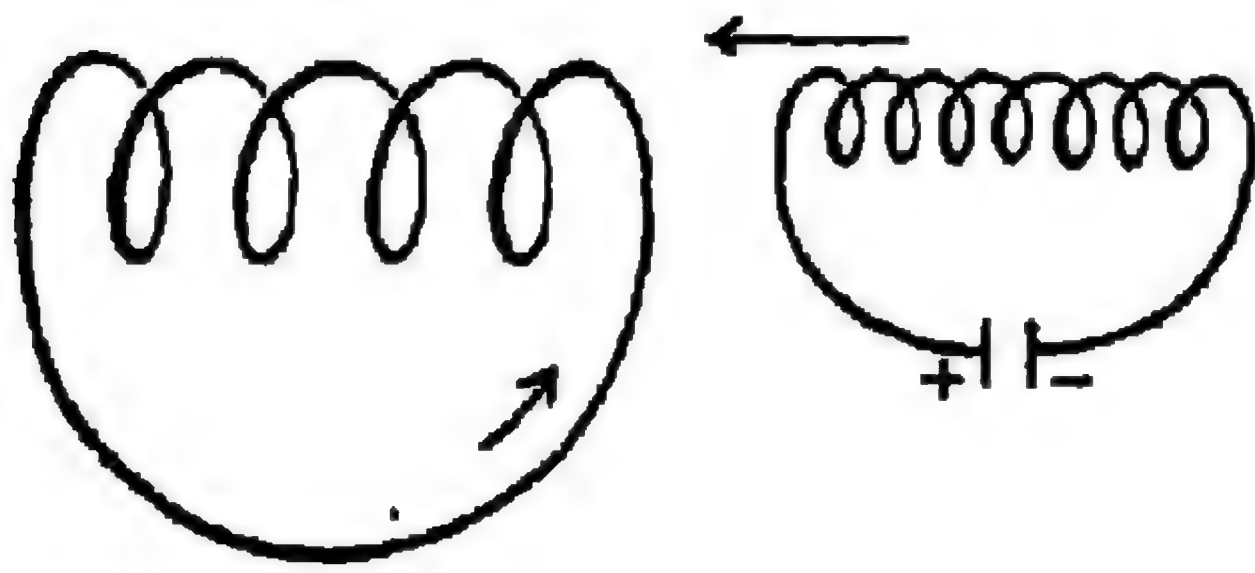


خلال السلك . وعلى ذلك يتلاشى كل من التيار والمجال الكهربائي عندما يسكن المغناطيس ثانية .

تخيل مؤقتاً أن لغة المجال غير معروفة وأنه يجب وصف نتائج هذه التجربة كماً ونوعياً بلغة الميكانيكا القديمة : على ذلك تبين هذه التجربة أنه نتيجة لحركة المزدوج المغناطيسى ولدت قوة جديدة تحرك المائع الكهربائي فى السلك . ويكون

السؤال الثاني كما يأتي : ما الذي تتوقف عليه هذه القوة ؟ وتكون الإجابة على هذا السؤال في غاية الصعوبة . فيكون من المحتم علينا أن ندرس علاقة القوة بسرعة المغناطيس وشكله وبشكل الدائرة . وزيادة على ذلك ، فإننا إذا عبرنا عن هذه التجربة باللغة القديمة فإنها لا تعطينا أية إشارة على الإطلاق للدلالة على ما إذا كان من الممكن إنتاج تيار بالتأثير بتحريك دائرة كهربائية أخرى تحمل تياراً بدلاً من تحريك قضيب مغناطيسي .

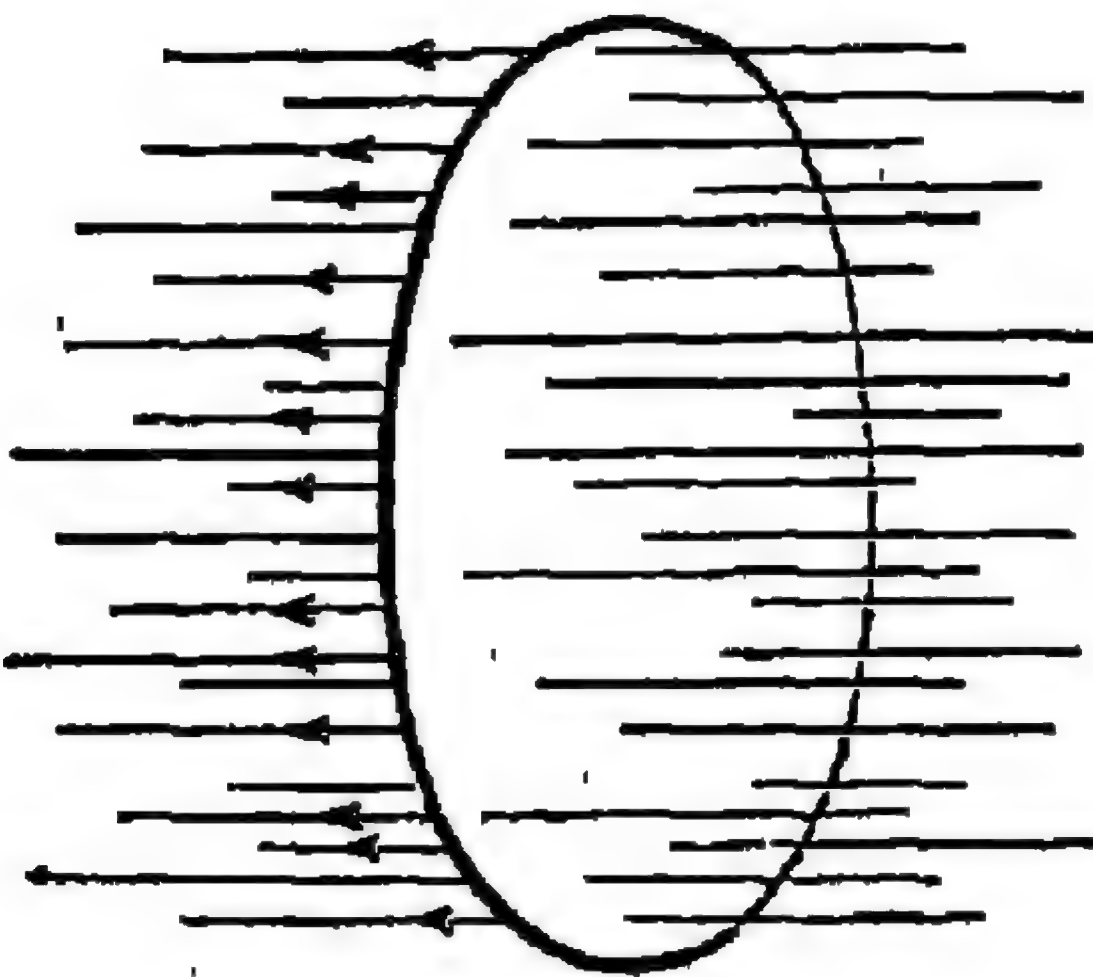
تختلف الحالة تماماً إذا استعملنا لغة المجال وفرضنا مرة أخرى أن المجال هو الذي يحدد جميع التأثيرات . نرى على الفور أن الملف الحزوني الذي يمر فيه تيار يقوم مقام قضيب المغناطيس تماماً . يبين الشكل ملفين اسطوانيين الأول صغير يمر فيه تيار ، والثاني وهو الأكبر نختبر به وجود التيار المنتج بالتأثير . يمكننا



أن نحرك الملف الحزوني كماحركنا قضيب المغناطيس من قبل . كما يمكننا بدلاً من تحريك الملف الصغير أن نولد مجالاً

مغناطيسياً ونلاشيه بتوليد التيار وملاشاته ، أي بفتح وقفل الدائرة . مرة أخرى ثبتت عملياً صحة حقائق جديدة نتجت عن نظرية المجال .

فلنعتبر مثلاً أبسط من ذلك . لدينا سلك مقفل ولا يوجد أي مصدر للتيار . بالقرب من هذا السلك يوجد مجال مغناطيسي . وليس من المهم معرفة مصدر هذا المجال الذي قد يكون دائرة أخرى يمر فيها تيار أو قضيب مغناطيسي . يبين



الشكل الدائرة المقفلة وخطوط القوة المغناطيسية . إن الوصف الكمي والنوعي لظاهرة إنتاج التيارات بالتأثير بسيط جداً إذا استخدمنا لغة المجال . وكما هو مبين في الشكل تمر بعض خطوط القوة خلال السطح المحدود بالسلك .

وينجب علينا دراسة خطوط القوى التي تقطع ذلك الجزء من المستوى الذي يحيط به السلك . لا يوجد أى تيار كهربائى مادام المجال لا يتغير مهما كانت شدته . ولكن يبدأ تيار فى المرور فى السلك بمجرد أن يتغير عدد خطوط القوة التي تخترق السطح المحاط بالسلك . ويتمين التيار تماماً بالتغير فى عدد خطوط القوة التي تخترق السطح مهما كان السبب فى حدوث هذا التغير . والتغير فى عدد خطوط القوة هو الشيء الوحيد الضرورى لوصف التيار المنتج بالتأثير كميّاً أو نوعياً . «عدد خطوط القوى يتغير» يعنى أن تكاثف الخطوط يتغير ، وهذا كما يذكر القارىء يعنى أن شدة المجال تتغير .

وهذه هى الحقائق الهامة فى سلسلتنا المنطقية : تغير فى مجال مغناطيسى . — تيار منتج بالتأثير — حركة شحنة — وجود مجال كهربائى . وعلى ذلك : يصطحب المجال المغناطيسى المتغير بمجال كهربائى .
بذلك وجدنا أهم دعامتين لنظرية المجال الكهربائى والمغناطيسى . الدعامات الأولى هى العلاقة بين المجال الكهربائى المتغير والمجال المغناطيسى . وقد ظهرت هذه العلاقة من تجربة أورستد على انحراف الإبرة المغناطيسية وأدت إلى النتيجة الآتية : يصطحب المجال الكهربائى المتغير بمجال مغناطيسى . أما الدعامات الثانية فهى تربط بين المجال المغناطيسى المتغير وبين التيارات المنتجة بالتأثير وقد ظهر هذا الارتباط من تجربة فارادى . وقد كانت كل من هاتين العلاقتين أساساً للوصف الكمى .

مرة أخرى يظهر المجال الكهربائى الذى يصاحب المجال المغناطيسى المتغير كأنه شيء حقيقى . ونحن فىما سبق أن المجال المغناطيسى يكون موجوداً رغم عدم وجود قطب الاختبار . بالمثل يجب أن نقول هنا أن المجال الكهربائى يوجد رغم عدم وجود السلك الذى يدل على وجود التيار المنتج بالتأثير .

وفى الواقع يمكن اختصار هاتين الدعامتين إلى دعامة واحدة ألا وهى نتيجة تجربة أورستد فمن الممكن استنتاج نتيجة تجربة فارادى من تجربة أورستد وقانون بقاء الطاقة . ولقد استخدمنا الدعامتين لغرض التوضيح والاقتصاد فقط .

يجب ذكر نتيجة أخيرة للوصف بالمجال . نفرض أن لدينا دائرة يمر فيها تيار ونفرض أن مصدر التيار هو بطارية قولتا مثلاً . نفرض أن الاتصال بين السلك وبين مصدر التيار قد قطع فجأة . طبعاً لا يوجد تيار الآن ! . ولكن أثناء فترة قطع الاتصال الصغيرة تحدث عملية متداخلة معقدة ، وهي عملية من الممكن التنبأ بها من نظرية المجال . قبل قطع التيار كان يوجد مجال مغناطيسى . يتغير عدد خطوط القوة التى تخترق السطح المحدد بالسلك سريعاً جداً . ولكن هذا التغير السريع مهما كان السبب فى حدوثه ، لا بد وأن يولد تياراً بالتأثير . والذى يهم فى الواقع هو التغير فى المجال المغناطيسى . والتيار المنتج بالتأثير يكون أشد كلما ازداد هذا التغير . هذه النتيجة هى اختبار جديد للنظرية . يجب أن يصاحب قطع التيار ظهور تيار شديد ولحظى منتج بالتأثير . ومرة أخرى يتحقق ذلك عملياً . وكل شخص قطع دائرة كهربائية لا بد وأن يكون قد لاحظ ظهور شرارة . تدل هذه الشرارة على الفرق الكبير فى الجهد الذى يسببه التغير فى المجال المغناطيسى . ويمكننا النظر إلى هذه العملية من وجهة نظر أخرى هى وجهة نظر الطاقة . اختفى مجال مغناطيس وتولدت شرارة . الشرارة تمثل طاقة وإذن فلا بد أن يمثل المجال المغناطيسى طاقة . وإذا كنا سنستعمل فكرة المجال ولغته باستمرار فلا بد وأن نعتبر المغناطيس كاستودع للطاقة . فهذه الطريقة وحدها نتمكن من وصف الظواهر الكهربائية والمغناطيسية دون أن نناقض قانون بقاء الطاقة .

إن المجال الذى بدأ كنموذج معين أخذ يزداد واقعية . لقد ساعدنا على فهم حقائق قديمة وقادنا إلى حقائق جديدة . وإن ربط الطاقة بالمجال هو خطوة إلى الأمام فى الطور الذى أخذنا فيه نهتم بفكرة المجال وتمحط فكرة السيل أو المائع الضرورية لوجهة النظر الميكانيكية .

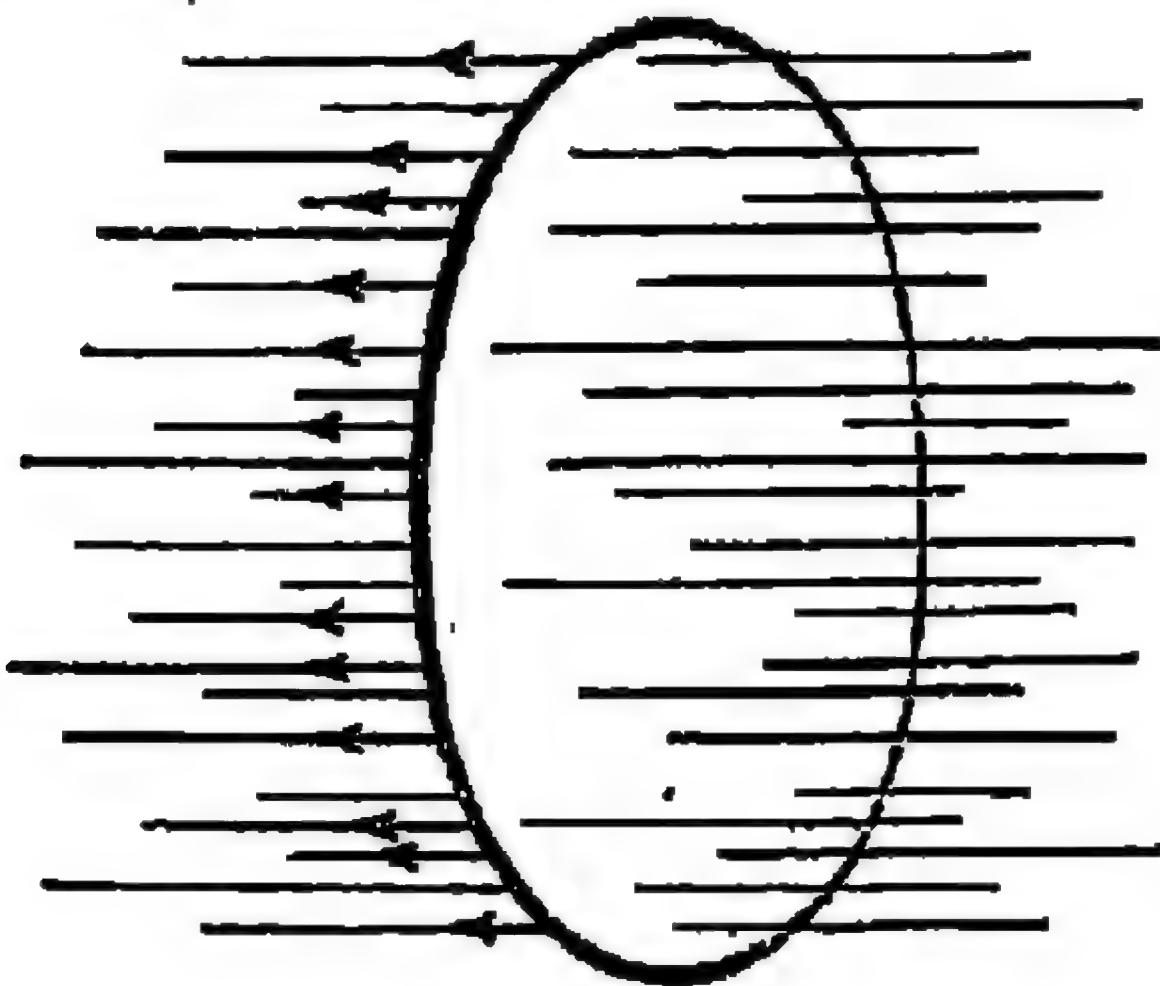
واقعية المجال :

يمكن تلخيص الوصف الكمي والرياضي لقوانين المجال فى المعادلات المسماة بمعادلات ماكسويل . ولقد أدت الحقائق التى ذكرناها فيما سبق إلى صياغة هذه

المعادلات ومع ذلك فهي تدل على أكثر مما أمكننا الإشارة إليه . وبساطة هذه المعادلات تخفى عمقها الذي لا يظهر إلا بالدراسة الدقيقة . وتعد صياغة هذه المعادلات أهم حدث في علم الطبيعة منذ عهد نيوتن . والسبب في ذلك هو أنه فضلاً عن اتساع مجالها فهي تكون نموذجاً لنوع جديد من القوانين . ويمكن تلخيص معادلات ماكسويل (التي تظهر في جميع معادلات علم الطبيعة الحديث الأخرى) في جملة واحدة . معادلات ماكسويل هي قوانين تمثل تركيب المجال .

لماذا تختلف معادلات ماكسويل في الشكل والصفات عن معادلات الميكانيكا الكلاسيكية ؟ وماذا نعني بقولنا أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال ؟ وكيف يمكننا باستعمال نتائج تجربتي أورستد وفارادى تكوين نوع جديد من القوانين تثبت أهميته البالغة في التطورات التالية لعلم الطبيعة ؟

لقد رأينا من تجربة أورستد كيف ينتج مجال مغناطيسى حول مجال كهربائى متغير . ورأينا من تجربة فارادى كيف ينتج مجال كهربائى حول مجال مغناطيسى متغير . سنوجه اهتمامنا مؤقتاً إلى إحدى هاتين التجربتين ، إلى تجربة فارادى مثلاً ، لنحصل على بعض الخواص المميزة لنظرية ماكسويل . سنعتبر مرة أخرى الشكل الذى يمثل نشأة تيار منتج بالتأثير من مجال مغناطيسى متغير . نعلم أن التيار



ينتج بالتأثير إذا تغير عدد خطوط القوة التى تخترق السطح المحدد بالسلك . على ذلك يظهر التيار المنتج بالتأثير إذا تغير المجال أو إذا تغير شكل الدائرة أو إذا تحركت الدائرة . وإذا راينا جميع

هذه الاحتمالات ودرسنا التأثيرات التى تنتج عن كل منها فمن المؤكد أن ذلك يودى إلى نظرية معقدة جداً . ولكن ألا يمكننا تبسيط هذه المسألة ؟ دعنا نحذف من دراستنا كل ما يتعلق بشكل الدائرة وطولها والسطح انحدز بالسلك

لنتخيل أيضاً أن الدائرة في الشكل السابق تصغر تدريجياً إلى أن تصبح دائرة كهربائية صغيرة جداً حول نقطة معينة في الفراغ . في هذه الحالة لا يكون لشكل الدائرة أو حجمها أى تأثير على دراستنا . في هذه العملية النهائية التى يؤول فيها المنحنى المقفل إلى نقطة يختفى كل من الشكل والحجم أوتوماتيكياً من دراستنا ونحصل على قوانين تربط بين التغير في المجال المغناطيسى والكهربائى عند نقطة اختيارية في الفراغ وعند لحظة اختيارية .

وعلى ذلك تكون هذه هى إحدى الخطوات الأساسية المؤدية إلى معادلات ماكسويل . ومرة أخرى هذه هى تجربة مثالية تجرى في الخيال بتكرار تجربة فارادى على دائرة صغيرة تؤول في النهاية إلى نقطة .

يجب علينا أن نسمى ماسبق نصف خطوة بدلاً من خطوة كاملة . حتى الآن كان اهتمامنا موجهاً إلى تجربة فارادى . ولكن يجب دراسة دعامة المجال الثانية المبنية على تجربة أورستد بطريقة مشابهة وبنفس الدرجة من الدقة . في هذه التجربة تلتف خطوط القوة المغناطيسية حول التيار . إذا جعلنا الخطوط الدائرية للقوة المغناطيسية تصغر وتؤول إلى نقطة نحصل على النصف الثانى للخطوة . وتعطينا الخطوة كلها علاقة بين التغير في كل من المجالين الكهربائى والمغناطيسى عند نقطة اختيارية في الفراغ ، وعند لحظة اختيارية .

ولكن تلزم خطوة أخرى أساسية . حسب تجربة فارادى يجب أن يوجد سلك يدل على وجوه المجال الكهربائى كما يجب أن يوجد قطب مغناطيسى أو إثارة مغناطيسية لاختبار وجود مجال مغناطيسى في تجربة أورستد . ولكن نظرية ماكسويل الجديدة تذهب إلى أبعد من هذه الحقائق العملية . فحسب نظرية ماكسويل المجال الكهربائى والمغناطيسى أو باختصار المجال الكهرمغناطيسى هو شئ حقيقى واقعى . فالمجال المغناطيسى المتغير يولد مجالاً كهربائياً بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود سلك يدل على وجود هذا المجال ، والمجال الكهربائى المتغير يولد مجالاً مغناطيسياً بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود قطب مغناطيسى للدلالة على وجوده .

أى أن هناك خطوتين قد أدتا إلى معادلات ماكسويل . الخطوة الأولى : عند دراسة تجربتي أورستد ورولاندا كان من الضروري أن يصغر كل من خط المجال المغناطيسى الدائرى الملفت حول التيار والمجال الكهربائى المتغير ويؤول إلى نقطة ، وعند دراسة تجربة فارادى كان من الضروري أن يصغر خط المجال الكهربائى الدائرى الملفت حول المجال المغناطيسى المتغير ويؤول إلى نقطة . والخطوة الثانية هى النظر إلى المجال على أنه شىء حقيقى واقعى ، فالمجال الكهرومغناطيسى بمجرد تولده يؤثر ويتغير حسب قوانين ماكسويل .

ومعادلات ماكسويل تصف تركيب المجال الكهرومغناطيسى . وتطبق هذه المعادلات عند أى نقطة فى الفراغ على عكس القوانين الميكانيكية التى لا تطبق إلا حيث توجد مادة أو شحنات .

ونحن نذكر كيف كانت الحالة فى الميكانيكا . إذا علمت القوة المؤثرة على جسيم عند أى لحظة وسرعة وموضع الجسيم عند لحظة واحدة فقط فإن من الممكن التنبأ بمسار الجسيم . وفى نظرية ماكسويل إذا علمنا المجال عند لحظة واحدة فقط يمكننا باستخدام معادلات النظرية استنتاج الكيفية التى يتغير بها المجال عند أية لحظة وعند أى نقطة فى الفراغ . يمكننا معادلات ماكسويل من تتبع تاريخ المجال كما يمكننا المعادلات الميكانيكية من تتبع تاريخ الجسيمات المادية .

ولكن لا يزال هناك فرق أساسى بين القوانين الميكانيكية وقوانين ماكسويل . إذا قارنا قوانين نيوتن للجاذبية وقوانين ماكسويل للمجال تتضح بعض الخواص المميزة التى تعبر عنها هذه المعادلات .

بمساعدة قوانين نيوتن يمكننا استنتاج حركة الأرض من القوة المؤثرة بين الشمس والأرض وهذه القوانين تربط بين حركة الأرض وبين تأثير الشمس (البعيدة جداً) عليها . فالأرض والشمس رغم كبر البعد بينهما تمثلان معاً فى مسرحية القوى .

فى نظرية ماكسويل لا يوجد ممثلون ماديون . تعبر المعادلات الرياضية لهذه النظرية عن القوانين التى يتبعها المجال الكهرومغناطيسى ، وهى ، على خلاف

قوانين نيوتن ، لا تربط بين حدثين بعيدين جداً . فهي لا تربط بين ما يحدث هنا بالظروف هناك . فالجمال في مكان ما في لحظة معينة يتوقف على المجال في الجوار المباشر عند اللحظة السابقة . إذا علمنا ما يحدث عند نقطة معينة الآن فإن معادلات ماكسويل تمكننا من التنبؤ بما سيحدث في الجوار المباشر لهذه النقطة بعد زمن قليل . تمكننا هذه المعادلات من زيادة معلوماتنا عن المجال بخطوات قصيرة . ويمكننا استنتاج ماذا يحدث هنا من الذي حدث في مكان بعيد ، بجمع هذه الخطوات القصيرة جداً ، أما في نظرية نيوتن فلا يسمح إلا بخطوات كبيرة تربط بين أحداث بعيدة . ويمكن الحصول مرة ثانية على نتائج تجريبية فارادى وأورستد من نظرية ماكسويل عن طريق واحد هو جمع خطوات صغيرة كل منها يتبع معادلات ماكسويل . تبين الدراسة الرياضية الدقيقة لمعادلات ماكسويل أنه يمكن استنتاج نتائج جديدة وغير متوقعة . ويمكن اختبار النظرية اختباراً قاسياً لأن النتائج النظرية لها الآن صفة كمية ويكشف عنها بواسطة سلسلة كاملة من الحجج المنطقية .

لنتخيل مرة أخرى تجربة مثالية . قوة خارجية تؤثر فتجعل كرة مشحونة بالكهرباء تذبذب بسرعة بحيث تكون حركتها مثل حركة البندول . كيف سنستخدم معلوماتنا عن تغيرات المجال في وصف كل ما يحدث هنا بلغة المجال ؟

نحدث ذبذبة الشحنة مجالاً كهربائياً متغيراً ، وهذا يصطحب دائماً بمجال مغناطيسي متغير إذا وضع سلك يكون دائرة مقفلة بالقرب من الشحنة فإن المجال المغناطيسي المتغير يصطحب بتيار كهربائي في الدائرة . ليس كل هذا إلا تكراراً لحقائق معلومة ، ولكن دراسة معادلات ماكسويل تجعلنا نعلم النظر في مسألة الشحنة الكهربائية المتذبذبة . بتطبيق معادلات ماكسويل رياضياً يمكننا العثور على صفات المجال المحيط بشحنة متذبذبة ، وعلى تركيبه بالقرب من المصدر وبعيداً عنه ، وعلى تغيرات هذا المجال بمرور الزمن . ونتيجة هذا التطبيق هو الموجة الكهرومغناطيسية . الشحنة المتذبذبة التي تتحرك بسرعة معينة في الفراغ تشع طاقة ولكن تحويل الطاقة ، أي حركة حالة من حالات المادة ، يميز جميع الظواهر الموجية .

لقد درسنا أنواعا مختلفة من الأمواج . كان لدينا الموجبات الطولية التي تنتج عن الكرة النابضة حيث تنتقل تغيرات الكثافة خلال الوسط . وكان لدينا أيضا الوسط الغروي الذي تنتشر فيه الموجات المستعرضة . ماهو نوع التغيرات التي تنتشر في حالة الموجة الكهرمغناطيسية ؟ مجرد تغيرات المجال الكهرمغناطيسي ! كل تغير في مجال كهربائي ينتج مجالا مغناطيسيا ، وكل تغير في مجال مغناطيسي ينتج مجالا كهربائيا ، كل تغير في . . . وهكذا . وحيث أن المجال يمثل طاقة فإن جميع هذه التغيرات المنتشرة في الفراغ بسرعة معينة تنتج موجة . وكما نستنتج من النظرية ، تقع جميع خطوط القوة الكهربائية والمغناطيسية دائما في مستويات عمودية على اتجاه الانتشار . على ذلك تكون الموجة الناتجة مستعرضة . لا تزال الصفات الأصلية لصورة المجال التي كونها من تجربتي أورستد وفارادى محتفظا بها ولكننا نتحقق الآن من أن لها معنى أعمق .

تنتشر الموجة الكهرمغناطيسية في الفراغ المطلق . ومرة أخرى هذه نتيجة للنظرية . إذا توقفت الشحنة المتذبذبة فجأة من الحركة فإن المجال يصبح مجالا الكتروستاتيكا . ولكن سلسلة الأمواج التي ولدتها حركة الشحنة تستمر في الانتشار . ويكون للموجات وجود مستقل ويمكن تتبع تاريخها كما تتبّع تاريخ أى شيء مادي آخر .

نفهم الآن لماذا تنشأ الصورة التي كونها للموجة الكهرمغناطيسية التي تنتشر بسرعة معينة في الفراغ والتي تتغير مع الزمن من معادلات ماكسويل . السبب الوحيد لذلك هو أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال الكهرمغناطيسي عند أى نقطة في الفراغ وعند أية لحظة .

هناك سؤال آخر في غاية الأهمية . ماهى السرعة التي تنتشر بها الموجة الكهرمغناطيسية في الفراغ المطلق ؟ تعطينا النظرية بمساعدة بعض الاحصائيات التي نحصل عليها من تجارب بسيطة لاعلاقة لها بالانتشار الفعلي للأمواج ، إجابة واضحة : سرعة الموجة الكهرمغناطيسية تساوى سرعة الضوء .

لقد كُنت تجربتنا أوردستد وفارادى الأساس الذى بنيت عليه قوانين ماكسويل وجميع النتائج التى حصلنا عليها حتى الآن نتجت عن الدراسة الدقيقة لهذه القوانين معبراً عنها بلغة المجال . وبعد الاكتشاف النظرى الذى يعين السرعة التى تنتشر بها الموجة الكهرمغناطيسية على أنها سرعة الضوء من أعظم الاكتشافات فى تاريخ العلم .

وقد حققت التجربة ما تنبأت به النظرية . فمذاً أكثر من خمسين عاماً ، أثبت هرتز بالتجربة لأول مرة وجود الموجات الكهرمغناطيسية وحقق عملياً أن سرعتها تساوى سرعة الضوء . وفى هذه الأيام يشاهد ملايين الناس الموجات الكهرمغناطيسية ترسل وتستقبل . والواقع أن أجهزتهم أعقد بكثير جداً من ذلك الذى استعمله هرتز ، وهى تشعر بوجود الموجات على بعد آلاف الأميال من مصدرها بدلاً من مجرد ياردات قليلة .

المجال والذئير :

تعرف الموجة الكهرمغناطيسية بأنها موجة مستعرضة تنتشر فى الفضاء بسرعة الضوء . ويوحى إلينا وجود سرعة واحدة للأمواج الضوئية والكهرمغناطيسية بضرورة وجود علاقة قوية بين الظواهر الضوئية والكهرمغناطيسية نفسها .

وعند ما كان علينا أن نفاضل بين نظرية الجسيمات والنظرية الموجية ، فضلنا النظرية الموجية لنجاحها فى شرح ظاهرة الحيود . فإذا فرضنا الآن أن الموجة الضوئية هى فى الحقيقة موجة كهرمغناطيسية فإن هذا الفرض لن يؤثر البتة فى تفسيرنا للظواهر الضوئية ، بل على العكس يمكننا من استخلاص نتائج جديدة أخرى . وإذا كان هذا الفرض صحيحاً فلا بد من وجود ارتباط ما بين الخواص الضوئية والكهربائية للمادة ، يسهل استنتاجه من النظرية . ويعتبر إيجاد هذا الارتباط وتحقيقه بالتجارب نصراً مبيناً للنظرية الكهرمغناطيسية .

ويعتبر هذا النصر أيضاً انتصاراً لنظرية المجال ، إذ قد أمكننا تمثيل فرعين

من العلوم مختلفين عن بعضهما بنظرية واحدة . فنظرية ماكسويل تشرح مثلاً ظاهرة التأثير الكهربائي وظاهرة انكسار الضوء . وينحصر الاختلاف بين الأضواء التي تشعربها العين وبين الأمواج الكهرومغناطيسية الأخرى في أن طول الموجة في الحالة الأخيرة قد يقصر حتى يصل إلى أطوال الأضواء الأولى وقد يزداد كثيراً كما هي الحال في الأمواج التي يستقبلها المذيع . أى أن الاختلاف فقط هو في أطوال الموجات .

وقد كانت النظرية الميكانيكية القديمة تهدف إلى شرح جميع الظواهر الطبيعية على أساس وجود قوى بين الجسيمات المادية . وعلى هذا الأساس ابتدعت فكرة السيل الكهربائي ، إذ كان من العسير على علماء القرن التاسع عشر تصور فكرة المجال ، فكانوا لا يفكرون إلا في المادة وتطوراتها وكل ما يتعلق بها .

وقد كان الفرض من استحداث فكرة الأثير في بدء الأمر هو المساعدة في تفهم الظواهر الطبيعية على الأساس الميكانيكي المادى ، فحاولوا مثلاً شرح القوة الموجودة بين جسيمين مشحونين بالكهرباء بأسباب خاصة بالجسيمين . أما الآن فإنه يجب علينا — طبقاً للآراء الحديثة الخاصة بالمجال — أن نعتبر المجال الموجود بين الشحنتين ، لا الشحنتين نفسيهما ، إذا أردنا دراسة تأثيرهما . وقد أخذ الاعتقاد بنظرية المجال يزداد قوة ووضوحاً وأخذت النظرية الميكانيكية في الاضمحلال وأدرك العلماء أن علم الطبيعة قد أشرف على فجر عهد جديد تحتل فيه نظريات المجال مكاناً كبيراً وأصبحنا الآن مثلاً ننظر إلى المجال الكهرومغناطيسى كنظرنا إلى شيء ملموس تماماً مثل المكتب الذى نجلس إليه .

ومن الإنصاف أن نذكر أن نظرية المجال الحديثة لم تقض على كل آثار النظرية الميكانيكية بل إنها قد أظهرت بعض محاسن هذه النظرية الأخيرة فضلاً عن مواطن الضعف فيها . ولسنا نقصد في كلامنا هذا نظريات السيل والمجال الكهربائيين فقط بل كل الظواهر الطبيعية ، فما زلنا مثلاً نعرف بوجود الشحنة الكهربائية نفسها رغماً عن اعتقادنا — حسب نظرية المجال — بأن الشحنة ما هي إلا مصدر للمجال الكهربائي . وكذلك أيضاً ما زلنا نعتقد في صحة قانون كولوم واحتواء

معادلات ما كسويل له . وهكذا يمكننا استخدام بعض المعتقدات القديمة في حدود لا يجب أن تتعدها .

ولكى نفهم حقيقة هذا التغيير يجب أن نذكر أن تكوين نظرية جديدة لا يشبه هدم كوخ حقير وبناء ناطحة سحاب بدلاً منها بل أقرب شياً بحال رجل يتسلق جبلاً فيتسع أفق نظره ويرى آفاقاً جديدة كلما ازداد ارتفاعه ، ويرى طرقاً ومسالك جديدة تصل بين البقاع الموجودة في سفح الجبل مما كان يتعذر عليه رؤيتها لو لم يبرح هذا السفح .

وفي الحقيقة أنه قد مضى زمن طويل قبل أن يستطيع الناس فهم الكنه الحقيقي لمعادلات ما كسويل ، فكان العلماء أولاً يشبهون المجال بالمادة ويحاولون استخدام فرض الأثير لفهم هذه المعادلات . ولكن الزمن كان خير كفيل بإنجاح فكرة المجال فسرعان ما تعاقبت انتصاراتها وزاد إيمان الناس بها وفقدت تبعاً لذلك نظرية الأثير الكثير من بهائها وروبقها وأخذ الناس في الانصراف عنها . وهكذا أصبح علينا الآن أن نسلم بأن الفراغ له خاصية السماح للأمواج الكهرومغناطيسية بالمرور . وقد يحدث بين الحين والآخر أن نذكر عرضاً كلمة الأثير ، وإن تعنى هذه الكلمة أكثر من الصفة الطبيعية التي ذكرناها الآن والتي تميز الفراغ . ورى من هذه التطورات الكثيرة التي لازمت فكرة الأثير منذ ولادتها فلم يصبح الآن يعنى وسطاً مكوناً من جسيمات مادية بل مجرد صفة طبيعية للفراغ .

وللأثير دور كبير أيضاً في نظرية النسبية سنتكلم عنه فيما بعد .

السفانة الميكانيكية :

لنرجع الآن قليلاً إلى الوراء ونعتبر قانون جاليليو للقصور الذاتي :
كل جسم يظل في حالة سكون أو حركة منتظمة في خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة خارجية .

لنتصور أنفسنا الآن نشاهد عالماً يريد تحقيق صحة هذا القانون أو عدمها بواسطة التجارب العملية . سيدفع العالم كرات صغيرة على سطح منضدة أفقية ملساء ، وسيلاحظ أن حركة الكرات تصبح أكثر انتظاماً كلما قل مقدار الاحتكاك بين الكرة وسطح المنضدة . لنضع الآن العالم يجري تجاربه ولنتصور أن الحجرة قد أخذت في الدوران فجأة في مستوى أفق حول محور في وسطها . سيشاهد العالم أن الكرة ذات الحركة المنتظمة أخذت في حركتها تقترب من طرف المنضدة الأكثر قرباً من جدران الحجرة أى الأكثر بعداً عن مركز الحجرة ومحور الدوران . بل إن العالم نفسه سيشعر بقوة غريبة تدفعه نحو جدران الحجرة ، سيحس بنفس الشعور الذى يعاينه راكبوا القطار عند ما يتحرك هذا الأخير في مسار دائرى ، أو كشعور راكب الأرجوحة السريعة الدوران . وفي هذه الحالة سيجد العالم أنه لا مندوحة من نبد قانون القصور الذاتى وجميع القوانين الميكانيكية في عالمه — أى حجرة — السريعة الدوران حول المحور . فإذا تصورنا شخصاً ولد وقضى كل حياته داخل هذه الحجرة الدائرة فإن قوانين الحركة التى سيشاهدها داخل الحجرة ستختلف تمام الاختلاف عن القوانين التى تخضع لها الأجسام خارج الغرفة . ولكن إذا دخل امرؤ الحجرة وهو عالم تماماً بحركتها الدورانية ولم بقوانين الطبيعة فإنه سيفسر عدم صلاحية القوانين الميكانيكية داخل الحجرة بأنه راجع لهذا الدوران ، ويمكنه إجراء بعض تجارب لمعرفة هذه الحركة الدورانية .

ولعلك تتساءل عن سبب اهتمامنا بالحجرة السريعة الدوران ؟ والجواب على ذلك هو أننا — نحن معشر سكان الكرة الأرضية — فى نفس وضع العالم الذى قضى عليه بالبقاء داخل الحجرة الدائرة طيلة حياته ، إذ أننا قد أدركنا منذ عهد كوبرنيكوس أن الأرض تدور حول نفسها وحول الشمس أيضاً فى نفس الوقت فإذا كان العالم الطبيعى لم يستطع إثبات قوانين الميكانيكا داخل الحجرة الدائرة فإننا أيضاً لن نستطيع تحقيقها على سطح الأرض ولكن حيث أن حركة الأرض الدورانية بسيطة نسبياً فإن تعديل قوانين الميكانيكا سيكون طفيفاً . وهناك تجارب

كثيرة تدانا على وجود اختلاف بسيط في قوانين الميكانيكا مما يدلنا على صحة الفرض بحركة الأرض الدورانية .

ومما يدعو إلى الأسف أنه ليس في استطاعتنا اختيار مكان بين الشمس والأرض يمكننا البقاء به لاختبار صلاحية قوانين الميكانيكا وحتى نرى بأعيننا حركة الأرض الدورانية . وإذن فلا مفر من أن نجرى تجاربنا على سطح الأرض التي نقضى حياتنا فيها ، ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة رياضياً بقولنا إن الأرض هي محاورنا الاحداثية » .

ولسكى نفهم معنى هذه العبارة الرياضية سنذكر المثال التالى : إذا ألقينا حجراً من قمة برج عال فإنه يمكننا تعيين ارتفاع هذا الحجر عن سطح الأرض عند أى لحظة أثناء سقوطه ، وذلك بتثبيت مقياس كبير بجوار البرج نستطيع بواسطته تعيين هذه الارتفاعات . والفروض طبعاً أن البرج والمقياس ليسا مصنوعين من المطاط أو أى مادة يحتمل أن يتغير شكلها أثناء التجربة . وفى الحقيقة أن ما نحتاج إليه لإجراء هذه التجربة — أى تعيين ارتفاعات الحجر أثناء سقوطه — لا يعدو المقياس المتماسك وساعة دقيقة فقط . فإذا توفر لدينا ذلك أمكننا تجاهل شكل البرج ، بل وحتى مجرد وجوده . وعند إجراء هذه التجربة لا نذكر عادة وجود المقياس والساعة حيث أن وجودهما مفروض بالبديهية ولا بد منه لتحقيق قانون جاليليو للأجسام الساقطة . وبفضل هذا الجهاز البسيط — أى المقياس والساعة — يمكننا تحقيق هذا القانون الميكانيكى لدرجة معينة من الدقة . وسنرى أن هناك فرقاً بين النتائج المستنتجة نظرياً من القانون الميكانيكى وبين النتائج العملية الناتجة من استخدام المقياس والساعة وذلك بسبب دوران الأرض . ويمكننا التعبير عن ذلك رياضياً أيضاً بقولنا : إن قوانين الميكانيكا ، على الصورة التى سبق ذكرها ، لا تتحقق تماماً فى المحاور الاحداثية المثبتة فى سطح الأرض .

ومن الطبيعى أنه يلزمنا فى جميع التجارب الميكانيكية على الإطلاق تعيين أماكن نقط مادية عند لحظات معينة ، كما حدث عند دراستنا للجسم الساقط من قمة البرج . ولكن يجب ألا يغيب عن بالنا أن موضع الجسم الساقط فى أية لحظة

يجب أن ينسب إلى شيء ما كالبرج أو المقياس مثلاً ، إذ لا بد من وجود إحداثيات نشير إليها كسقالة ميكانيكية حتى نستطيع تعيين أماكن الأجسام . وهذا ما يحدث عند تعيين أماكن الأفراد والمباني في مدينة ما إذ تكون شبكة الطرق والميادين مجموعة أحداثية نشير إليها . وعند ما ذكرنا قوانين الميكانيكا فيما سبق لم تهتم بتعيين الاحداثيات ، لأننا بسبب وجودنا على سطح الأرض لن نجد أية صعوبة في اختبار إحداثيات ما وثبيتها على سطح الأرض .

ولم نشر بشيء إلى الاحداثيات المتبعة في جميع القوانين والفروض الطبيعية التي سبق ذكرها حتى الآن ، بل حتى تجاهلنا مجرد وجودها . فمثلاً عندما ذكرنا « يتحرك الجسم بانتظام » كان يجب علينا أن نكتب « يتحرك الجسم بانتظام بالنسبة إلى احداثيات معينة » . ولا غرو فقد علمتنا تجربة الحجرة السريعة الدوران أن نتائج التجارب الميكانيكية قد تتوقف على الاحداثيات المختارة .

وإذا فرضنا أن لدينا مجموعتين من الإحداثيات تدور كل منها بالنسبة للأخرى فإن قوانين الميكانيكا لن تتحقق في كليهما معاً . فإذا اتخذنا سطح الماء الساكن في حوض سباحة مثلاً أساساً لأحداثياتنا فإن سطح الماء في حوض سباحة آخر — يتحرك حركة دورانية سريعة بالنسبة للأول — لن يكون أفقياً في هذه الأحداثيات ، بل يتخذ الشكل الذي يأخذه سطح اللبن في كوب عندما نحركه بواسطة ملعقة صغيرة .

وعند ما بدأنا صباغة قواعد الميكانيكا فإنا أن نذكر شيئاً مهماً ، ألا وهي الاحداثيات التي تتحقق فيها هذه القوانين . لنسرع بالمرور على هذه النقطة ولنقدم الفرض التقريبي بأن هذه القوانين تتحقق في كل الاحداثيات المثبتة في سطح الأرض . وبذلك تتحدد جميع نتائجنا بالنسبة إلى أحداثيات معينة . هذا على الرغم من أن سطح الأرض لا يصلح تماماً لكي نتخذه كأساس لمجموعة أحداثية .

لنفرض إذن أن لدينا مجموعة من الأحداثيات تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ، ولنتساءل الآن عما إذا كانت هذه المجموعة هي الوحيدة ؟ لنحاول اتباع أحداثيات

أخرى كقطار أو سفينة أو طائرة مثلا متحركة بالنسبة للأرض ولنبحث الآن فيما إذا كانت قوانين الميكانيكا ستظل نافذة بشكلها المألوف في هذه الأحداثيات الجديدة . وتدلنا أمثلة القطار المتحرك في مسار منحني أو السفينة المدفوعة بعاصفة أو الطائرة التي تدور حول نفسها على أن قوانين الميكانيكا هذه لن تكون صحيحة على الإطلاق . لنبدأ الآن بدراسة تجربة بسيطة تعتبر فيها مجموعة أحداثية معينة متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لأحداثياتنا المفروضة ، أى التي تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ؛ أى كقطار أو سفينة تتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم . تدلنا المشاهدات العملية في مثل هذه الأحوال على أن التجارب التي سنقوم بها في القطار أو السفينة ستمطينا نفس النتائج التي نحصل عليها لو أجرينا هذه التجارب على سطح الأرض . ولكن إذا وقف القطار على حين غرة أو ازدادت سرعته فجأة أو إذا اشتد هياج البحر فإننا نشاهد حدوث ظواهر غريبة . فنشاهد سقوط الحقائب والأمتعة في القطار ، ويحتمل توازن الموائد والقاعد وتتناثر هنا وهناك فوق السفينة ويشعر المسافرون بدوار البحر . ويدلنا ذلك كله من الناحية الطبيعية العامة بأن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق أو تطبق على مثل هذه الأحداثيات ، أى أن هذه الأحداثيات تعتبر غير ملائمة .

ويمكننا التعبير عن هذه النتيجة بنظرية جاليليو النسبية : إذا كانت قوانين الميكانيكا صحيحة في أحداثيات معينة ، فإنها ستظل متحققة في أية أحداثيات أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى . فإذا كان لدينا مجموعتان من الأحداثيات تتحركان بغير انتظام بالنسبة لبعضهما فإن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق في كليهما . وتسمى الأحداثيات التي تتحقق فيها قوانين الميكانيكا بأحداثيات القصور الذاتي .

لنعتبر الآن مجموعتين احداثيتين في نقطة معينة ، لنفرض أن إحداها بدأت تتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى ، كقطار أو سفينة تتحرك بالنسبة إلى سطح الأرض مثلا . سنجد أننا نستطيع تحقيق قوانين الميكانيكا لنفس الدرجة من الدقة في كل من الأرض والقطار أو السفينة المتحركين بانتظام . ولكن إذا وقع

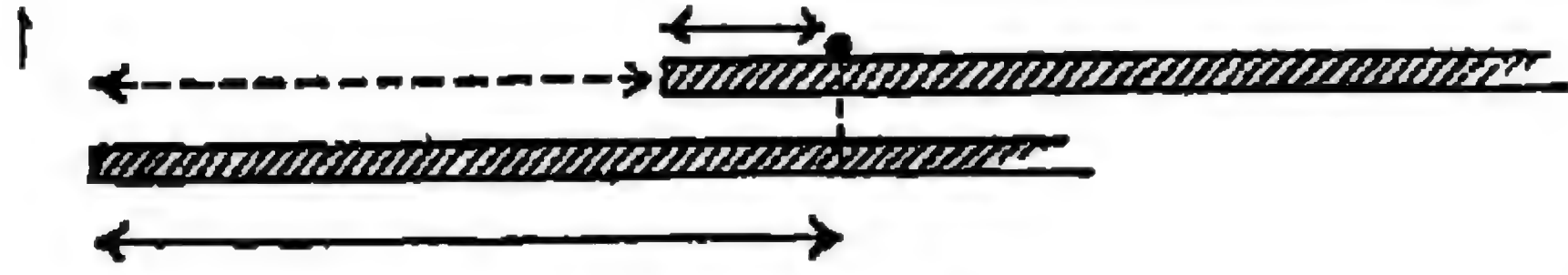
حدث ما ، وحاول مشاهدان كل منهما في مجموعة أحداثية مختلفة ، تسجيل نتائجها فإن المسألة تصبح أكثر تعقيداً . فلنفرض الآن أننا حاولنا دراسة حركة نقطة مادية من مجموعتين أحداثيتين مختلفتين كالأرض وقطار متحرك بسرعة منتظمة مثلاً . نظراً إلى أن هاتين المجموعتين هما من نوع أحداثيات القصور الذاتى ، فإنه يكفي أن نعلم النتائج التى سجلها أحد المشاهدين والسرعة النسبية ، وأما كن المجموعتين عند لحظة معينة لى نستطيع أن نوجد النتائج التى سيجدها المشاهد الآخر . إذ أنه من المهم جداً لوصف الأحداث أن نعرف كيف تنتقل من مجموعة أحداثية إلى أخرى ، حيث أنهما متكافئتان ومناسبتان لوصف أحداث الطبيعة ، وبذلك نستطيع معرفة النتائج التى يحصل عليها مشاهد فى إحدى المجموعتين من تلك التى يجدها آخر فى المجموعة الثانية .

لندرس الآن المسألة من الناحية المجردة دون ذكر سفينة أو قطار أو غيره ، ولنعتبر الحركة فى خطوط مستقيمة . سنفرض أن لدينا مقياساً متماسكاً وساعة دقيقة . وفى حالة الحركة فى خط مستقيم سيكون المقياس هو مجموعتنا الأحداثية ، كما كان مقياس البرج فى تجربة جاليليو . ومن الأسهل دائماً أن نعتبر مجموعتنا الأحداثية فى حالة الحركة فى خط مستقيم كقضبان مقياس متماسكة ، وفى حالة الحركة فى الفراغ ، كسفالة متماسكة مصنوعة من قضبان رأسية وأفقية .

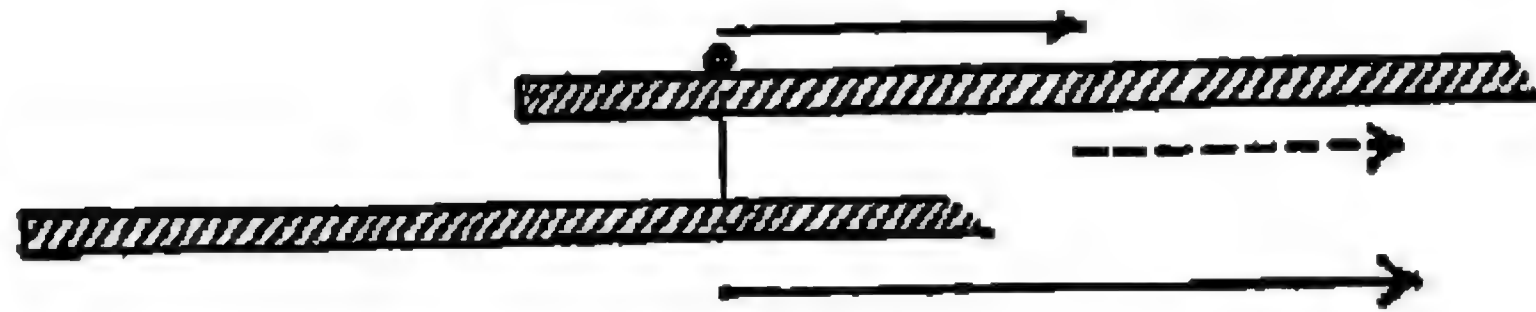
لنفرض أن لدينا مجموعتين من الأحداثيات ، أى مقياسين متماسكين ولتأملهما بخطين مستقيمين أحدهما فوق الآخر ، ولنطلق عليهما الأحداثيات العليا والسفلى ولنفرض أيضاً أن هاتين المجموعتين تتحركان بسرعة نسبية معينة كل بالنسبة للآخر أو بعبارة أخرى أن أحد المستقيمين ينزلق فوق الآخر . ولعلنا من الأنسب أن نفرض أن هذين المقياسين لهما طولان لانهاثيان ، وأنه ليس لدينا سوى ساعة واحدة ، حيث أن الزمن يسير بمعدل واحد فى كلا المجموعتين . ولنفرض أنه عند بدء التجربة كانت نقطتا ابتداء المقياسين منطبقتين ، أى أنه عند هذه اللحظة كانت لهما نفس أرقام التدرج ولكن هذه الأرقام ستختلف عند الحركة بالطبع . لنفرض الآن أن هناك نقطة مادية مثبتة فى المقياس العلوى وإذن فسيكون الرقم المحدد

لموضعها على المقياس العلوى ثابتاً لا يتغير بمرور الزمن في حين أن الرقم المعين لموضعها على المقياس السفلى سيتغير باستمرار . دعنا نستبدل العبارة « الرقم المعين لموضع النقطة على المقياس » باللفظ المرادف « أحداثها » .

ح ب



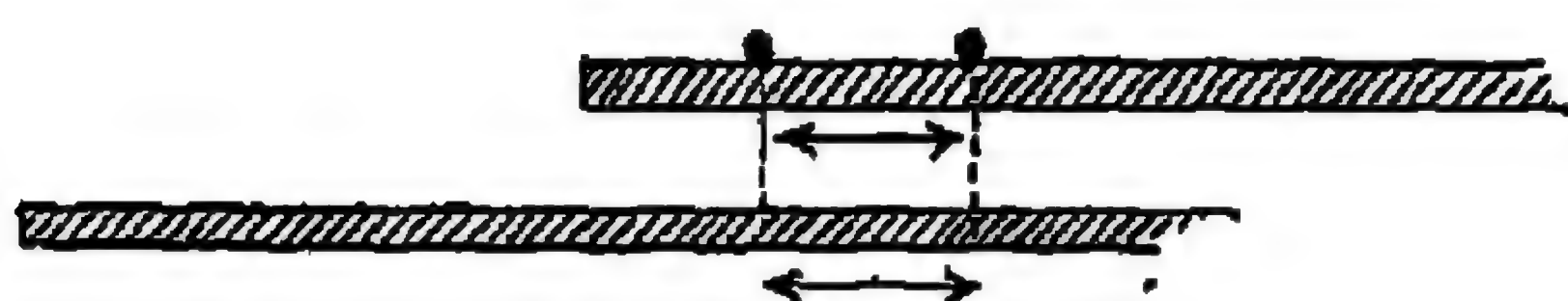
وكما هو مبين في الشكل يمكننا القول بأن أحداثي الجسم المادى في المجموعة الأحداثية السفلى (أى الطول ا ح) يساوى أحداثي الجسم في المجموعة العليا (أى ب ح) مضافا إليه أحداثي نقطة الابتداء ، (أى ا ب) . أى أننا يمكننا دائما تقدير موضع جسم في مجموعة أحداثيات معينة إذا عرفنا موضعه في مجموعة أخرى . ولهذا السبب يجب علينا أن نعرف الأوضاع النسبية للمجموعتين الأحداثيتين في كل لحظة . ولنعذرنا القارى لهذا الإسهاب في هذه النقطة البسيطة ولذلك لفائدته فيما سيلي بعد ذلك . ويجدر بنا أن نلاحظ الفرق بين تعيين مكان نقطة ما ووقت وقوع حدث معين ، إذ أن لكل شاهد مقياسة الخاص به (أى مجموعته الأحداثية) في حين أن ليست هناك سوى ساعة توقيت واحدة ، أى أن الزمن يبدو كشيء مطلق واحد بالنسبة لجميع المشاهدين في المجموعات المختلفة .



وسنذكر الآن مثلاً آخر : يتجول رجل على سطح سفينة كبيرة بمعدل ثلاثة أميال في الساعة ، أى أن هذه هي سرعته النسبية بالنسبة إلى السفينة ، أو بعبارة أخرى بالنسبة إلى أحداثيات مثبتة في السفينة فإذا كانت سرعة السفينة ثلاثين ميلاً في الساعة بالنسبة إلى الشاطئ وإذا كان اتجاه سرعة السفينة وحركة الرجل المتضمتين في نفس الاتجاه فإن سرعة الرجل تكون ثلاثة وثلاثين ميلاً في الساعة بالنسبة إلى مشاهد قابع بالشاطئ أو ثلاثة أميال بالنسبة إلى شاهد جالس على ظهر السفينة . أى أننا يمكننا التعبير عن هذه الظاهرة بشكل عام كما يلي « تكون سرعة

نقطة مادية بالنسبة للأحداثيات السفلى مساوية لسرعتها بالنسبة للأحداثيات العليا مضافاً إليها أو مطروحا منها سرعة الأحداثيات العليا على حسب ما إذا كانت السرعتان في اتجاه واحد أو اتجاهين مختلفين » وإذن فليست الأوضاع فقط بل وكذلك السرعة هي التي يمكننا دائماً تحويل قيمها من أحداثيات معينة إلى أخرى إذا علمنا سرعة المجموعتين الإحداثيتين النسبية . أى أن الأماكن والسرعة هي أمثلة للكميات التي تختلف قيمها باختلاف الأحداثيات وترتبط ببعضها بواسطة قوانين تحويل .

ومع ذلك فهناك كميات لا تتغير قيمها في كلا المجموعتين الإحداثيتين وإذن فلا تحتاج إلى قوانين تحويل . لنعتبر مثلاً نقطتين مثبتتين على المقياس العلوى ولنفس المسافة بينهما . ستكون هذه المسافة هي الفرق بين إحداثي النقطتين اللتين تنحصر بينهما . وإذا أردنا تعيين أماكن هاتين النقطتين بالنسبة لإحداثيات أخرى فأننا سنحتاج إلى استخدام قوانين تحويل . ولكن حينما نهتم بالفرق بين موضعى النقطتين فإن تأثير الإحداثيات المختلفة يتلاشى كما هو موضح فى الرسم . وإذن فالمسافة بين نقطتين هي « كمية لا متغيرة » أى أنها لا تتوقف على طريقة اختبار الأحداثيات .



والثال الثانى للكمية التي لا تتوقف على الأحداثيات هو التغير فى السرعة . وهى كمية مألوفة فى الميكانيكا . سنفرض مرة أخرى أن لدينا مشاهدين يلاحظان حركة نقطة مادية فى خط مستقيم . سيكون التغير فى سرعة هذه النقطة بالنسبة لكل مشاهد فى مجموعته ، هو فرق بين سرعتين وبذلك سيختلف كل أثر للسرعة النسبية المنتظمة للمجموعتين ، عند حساب هذا الفرق . وإذن ينتج أن التغير فى السرعة هو كمية « لا متغيرة » على أساس الفرض بأن الحركة النسبية للمجموعتين منتظمة . أما فى الحالة التى تكون فيها السرعة النسبية متغيرة فإن التغير فى السرعة

سيختلف في كلا من المجموعتين بسبب اختلاف السرعة النسبية بين المقياسين المثلين للمجموعتين الاحداثيتين .

وهاك المثال الأخير : لنفرض أن لدينا نقطتين ماديتين بينهما قوة تتوقف فقط على المسافة بينهما . ففي حالة السرعة النسبة المنتظمة . ستظل المسافة بين النقطتين وكذلك القوة ثابتة ، وحيث أن قانون نيوتن يربط بين القوة والتغير في السرعة ، فإننا نستنتج أن هذا القانون سيتحقق في كلا المجموعتين . أى أننا قد توصلنا مرة أخرى إلى النتيجة التي حققها المشاهدات اليومية وهي : إذا تحققت قوانين الميكانيكا في مجموعة احداثية فإنها تستمر كذلك في جميع الاحداثيات المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للمجموعة الأولى .

وقد استخدمنا في أمثالتنا السابقة الحركة في خط مستقيم حيث يمكننا تمثيل المجموعات الاحداثية بمقاييس متماسكة ، ولكن النتائج التي حصلنا عليها صحيحة وعامة ويمكننا تلخيصها فيما يلي :

١ — ليست لدينا أية وسائل لايجاد مجموعات احداثية قاصرة فاننا نستطيع تكوين عدد لانهاى منها ، حيث أن كل المجموعات الإحداثية التي تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها تصبح احداثيات قاصرة ، إذا كانت إحداها كذلك .

٢ — زمن وقوع حدث ما ثابت في جميع المجموعات الاحداثية ، ولكن الاحداثيات والسرع تختلف على حسب قوانين التحويل بين الاحداثيات .

٣ — على الرغم من اختلاف السرع والإحداثيات عند تحويلها من مجموعة إلى أخرى ، فإن القوة والتغير في السرع وبالتالي قوانين الميكانيكا تظل ثابتة بالنسبة إلى قوانين التحويل .

وسنطلق على قوانين التحويل الخاصة بالاحداثيات والسرع في الميكانيكا الكلاسيكية : قوانين التحويل الكلاسيكية أو باختصار «التحويل الكلاسيكي» .

الآثير والحركة :

تعتبر نظرية جاليليو النسبية صحيحة بالنسبة للظواهر الميكانيكية ، أى أن قوانين الميكانيكا تتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية القاصرة المتحركة بالنسبة لبعضها . ولعلنا تتساءل عما إذا كان من الممكن تعميم تلك النظرية لى تشمل أيضا الظواهر غير الميكانيكية ولا سيما تلك التى يلعب فيها المجال دورا كبيرا . وسيؤدى بنا البحث لإجابة هذا السؤال إلى مبادئ النظرية النسبية .

فمن المعلوم مثلا أن سرعة الضوء فى الفراغ أو بعبارة أخرى فى الأثير تبلغ ١٨٦٠٠٠ ميلا فى الثانية وأن الضوء هو عبارة عن مجموعة من الموجات الكهرمغناطيسية تنتشر خلال الأثير . ونعلم كذلك أن المجال الكهرمغناطيسى مصحوب دائما بقدر معين من الطاقة يمكننا إدراكها بمجرد اشعاعها .

وعلى الرغم من أننا نعلم حق العلم المصاعب العديدة التى تكتنف كنه التركيب الميكانيكى للأثير فإننا سنستمر مؤقتا فى الاعتقاد بأن الأثير هو وسط تنتشر فيه الأمواج الكهرمغناطيسية .

لنفرض الآن أننا جلوس فى حجرة زجاجية مغلقة معزولة عن العالم الخارجى فلا يمكن للهواء أن يتسرب منها أو إليها ، ثم أخذنا فى تبادل الأحاديث ، أى أننا أخذنا فى توليد وإرسال أموجاً صوتية تنتشر من مصادرها (أفواهنا) بسرعة الصوت فى الهواء . فإذا لم يوجد الهواء بين الفم المتحدث والأذن المنصتة ، فإننا لن نسمع أبداً أى صوت . وقد أثبتت التجارب العملية أن سرعة الصوت ثابتة فى جميع الاتجاهات إذا كان الهواء ساكنا فى المجموعة الإحداثية التى اخترناها .

لنفرض أن الحجرة أخذت الآن فى التحرك بسرعة منتظمة خلال الفضاء وأن هناك شاهدا خارج الغرفة يرى من خلال جدرانها الزجاجية كل ما يحدث داخلها ، وأن هذا المشاهد سيجاول قياس سرعة الصوت الصادر فى الغرفة المتحركة بالنسبة إلى إحداثيات مثبتة فى مكان وجوده . أى أننا سنعود مرة أخرى إلى

الكلام عن كيفية تعيين السرعة في أحداثيات معينة إذا كانت معروفة في مجموعة أخرى . سيدعى المشاهد الداخلي (أى داخل الغرفة) أن سرعة الصوت بالنسبة إليه ثابتة في جميع الاتجاهات في حين أن المشاهد الخارجي سيقدر أن سرعة الصوت الصادر في الحجرة المتحركة ، والتي قيست في مجموعته الاحداثية ، ليست ثابتة في كل الاتجاهات ، إذ أن قيمتها ستزيد عن القيمة القياسية ل سرعة الصوت في اتجاه حركة الغرفة وستقل في الاتجاه المضاد .

ومن السهل الوصول إلى هذه النتائج بواسطة التحويلات الكلاسيكية (يمكننا تحقيقها أيضاً بالتجربة) . إذ أن الحجرة تحمل معها الوسط المادى . أى الهواء - الذى تنتشر فيه أمواج الصوت وإذن ستختلف سرعة الصوت بالنسبة للمشاهدين الداخلى والخارجى .

ويمكننا استخلاص نتائج أخرى من نظرية الصوت باعتبارده كموجات تنتشر خلال وسط مادى . فمثلاً يمكننا إيجاد طريقة - ليست الوحيدة دون شك - للهرب من سماع كلام لانود سماعه ، وذلك بأن نبتعد عن التكلم بسرعة أكبر من سرعة الصوت بالنسبة للهواء المحيط به . وبذا لن تتمكن موجات الصوت غير المرغوب فيها من اللحاق بنا . وكذلك إذا سعى علينا التنبيه لكلمة سبق أن قيلت ونود معرفتها ، علينا أن نجرى بسرعة أكبر من سرعة الصوت كي تتمكن من اللحاق بالموجات التى تكون الكلمة المراد سماعها . وليس في هذين المثالين ما يصعب تصديقه سوى أن علينا أن نجرى بسرعة تبلغ أربعمئة ياردة في الثانية ، ولا شك أن التطور الصناعى الحديث سيجعل تحقيق ذلك في حيز الإسكان . وتطلق الرصاصة من فوهة نندقية بسرعة أكبر من سرعة الصوت ، فإذا تحرك شخص مامع هذه الرصاصة بسرعتها فإنه لن يسمع صوت انطلاقها من البندقية على الإطلاق .

وتتميز جميع هذه الأمثلة بطابع ميكانيكى بحت ، ولذا فقد يخطر ببالنا أن نضع الآن هذه الأسئلة المهمة : أيمكننا إجراء تجارب مشابهة لتلك التى قمنا بها في حالة الأمواج الصوتية مع أمواج الضوء ؟ وهل تنطبق نظرية جاليليو النسبية والتحويل الكلاسيكى على الظواهر الضوئية والكهربائية ؟ ولعله من المخاطرة أن

نجيب على هذه الأسئلة ببساطة بقولنا « نعم » أو « لا » قبل أن تفهم هذه المسائل حق الفهم .

ففي حالة الموجات الصوتية الصادرة داخل الحجرة المتحركة بانتظام ، بنينا نتائجنا على الاعتبارات الآتية :

تحمل الحجرة معها ما بداخلها من الهواء الذي تنتشر فيه أمواج الصوت .
ترتبط سرعتان المشاهدتان في مجموعتين إحدائيتين - تتحرك كل منهما بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى - بقوانين التحويل الكلاسيكية .

فإذا اعتبرنا الآن الأمواج الضوئية بدلاً من الأمواج الصوتية فإن الحالة تتغير إذ أن الشخصين لن يتكلم بل سيتراسلا بواسطة الأشارات أو الموجات الضوئية المنتشرة في جميع الاتجاهات . فلنفرض إذن أن مصادر الضوء مثبتة في الحجرة باستمرار وأن الموجات الضوئية تنتقل في الأثير كما تنتقل أمواج الصوت في الهواء .

ولكن هل يتحرك الأثير مع الحجرة كما فعل الهواء ؟ وبما أنه ليس لدينا صورة ميكانيكية عن الأثير فإنه من الصعب جداً الإجابة على مثل هذا السؤال .
إذا كانت الغرفة مغلقة فإن ما بداخلها من الهواء سيتحرك معها . ومن الواضح أنه ليس هناك أى معنى لمعاملة الأثير بالمثل ، حيث أن الأثير يخترق جميع الأجسام المادية ، فليست هناك حواجز تقف دونه . وفي هذه الحالة ستمثل الحجرة المتحركة مجموعة أحداثيات متحركة مثبت بها مصدر ضوئى . ومع ذلك فليس هناك ما يمنعنا من أن نتصور أن الحجرة المتحركة والحاملة لمصدر الضوء ، تحمل أيضاً معها الأثير ، تماماً كما كانت الحجرة المغلقة تحمل معها مصدر الصوت والهواء . ولكن يمكننا أيضاً تصور العكس ؛ أى أن الحجرة تتحرك خلال الأثير تماماً كما تتحرك سفينة خلال بحر عديم المقاومة للحركة ، فلا تحمل معها أى جزء من الوسط بل تتحرك خلاله فقط . ففي الحالة الأولى تحمل الحجرة الأثير مع مصدر الضوء وبذا تصبح الحالة مشابهة تماماً للحالة الصوتية وبذلك سنحصل على نتائج مشابهة . أما في الحالة الثانية فإن الغرفة المتحركة الحاملة لمصدر الضوء لن تحمل معها الأثير وبذلك

ستنعدم المشابهة مع الحالة الصوتية ولا يمكننا إذن تطبيق نتائج الحالة الصوتية على حالة الأمواج الضوئية . وهاتان الحالتان هما الاحتمالان النهائيان . وطبيعى أنه يمكننا الاسترسال فى الخيال فنفرض وجود الحالة الصعبة التى فيها تعطى الحجرة الحاملة للمصدر حركة جزئية للأثير . ولكن ليس هناك ما يجعلنا ندرس هذه الحالات المعقدة قبل أن نبحث فيما إذا كانت التجارب العملية تؤيد إحدى الحالتين النهائيتين البسيطتين .

وسنبداً الآن بدراسة إحدى هاتين الحالتين فنفرض أن الغرفة المتحركة تحمل معها الأثير وأن مصدر الضوء مثبت داخلها . فإذا كانت قاعدة التحويل اسرعات الموجات الصوتية صحيحة فإننا يمكننا معاملة الموجات الضوئية بالمثل . وليس هناك ما يدعو إلى الشك فى صحة قوانين التحويل التى تنص على أن السرعة تضاف إلى بعضها فى حالات وتطرح من بعضها فى أخرى . فنفرض إذن أن الأثير يتحرك مع الحجرة وأن قوانين التحويل صحيحة . فإذا ضغطنا الآن مثلاً زر كهربائى لإضاءة مصدر الضوء الموجود بالحجرة ، فإن موجات الضوء ستتحرك بسرعة ١٨٦٠٠٠ ميلاً فى الثانية . وبما أن المشاهد الخارجى سيلاحظ حركة الحجرة ، وبالتالي كذلك حركة المصدر ، المثبت فيها والأثير — الذى يحمل موجات الضوء — والذى تدفعه الحجرة على الحركة معها ، فإن استنتاجاته ستكون بأن سرعة الضوء — مقاسة فى أية مجموعة أحداثية خارجية — ستختلف باختلاف اتجاه الحركة . وستكون قيمة السرعة أكبر من القيمة القياسية إذا قيست فى اتجاه الحركة وأقل منها إذا قيست فى الاتجاه المضاد . أى أننا فى حالة الحجرة المتحركة والمثبت بها مصدر الضوء والتى تحمل معها الأثير قد توصلنا إلى النتيجة الآتية : تتوقف سرعة الضوء على سرعة المصدر نفسه ، إذا فرضنا صحة قوانين التحويل . أى أن سرعة الضوء الذى يصلنا من مصدر متحرك تكون أكبر من السرعة القياسية إذا كانت حركة المصدر فى اتجاهنا وأقل منها إذا كانت فى الاتجاه المتعاكس .

إذا أمكن اسرعتنا أن تزيد عن سرعة الضوء فإنه يصبح فى إمكاننا الهروب من إشارة ضوئية مقتربة منا . ويمكننا كذلك رؤية أحداث ماضية عند لحاقنا

بالأمواج الضوئية التي سبق إرسالها من قبل . وسنرى هذه الحوادث بترتيب عكسى لنظام حدوثها إذ أننا سنلحق أولا بالموجات المرسله حديثا ثم المرسله قبلها وهكذا . وستظهر أمامنا سلسلة الحوادث التي وقعت على سطح الأرض كصور فلم سينأى بدء فى عرضه من نهايته إلى أوله . وتنتج جميع هذه النتائج من الفرض بأن مجموعة الاحداثيات المتحركة تحمل معها الأثير وبأن قوانين التحويل الميكانيكية تتحقق دائما ؛ أى أن التشابه بين الضوء والصوت يكون تاما فى هذه الحالة .

ولكن ليس هناك ما يؤيد صحة هذه الاستنتاجات ، بل إن جميع التجارب التي أجريت بقصد تحقيقها قد أنت بنتائج عكسية على خط مستقيم وبشكل لا يحتمل الشك . هذا على الرغم من كون هذه التجارب غير مباشرة بسبب الصعوبات الفنية ألحمة الناتجة من كبر قيمة سرعة الضوء . أى أن نتائج هذه التجارب كلها هى : « لسرعة الضوء نفس القيمة فى جميع الاحداثيات ، غير متوقفة البتة على حركة مصدر الضوء وكيفيتها » .

ولن ندخل هنا فى وصف تفصيلي للتجارب العديدة التي تمكنا من الوصول إلى هذه النتيجة ، ولكن يمكننا ذكر بعض الاعتبارات التي وإن لم تثبت أن سرعة الضوء لا تتوقف على سرعة المصدر فإنها تجعل هذه الحقيقة مستساغة ومقنعة .. تتحرك الكرة الأرضية وزميلاتها من سيارات المجموعة الشمسية فى حركة دورانية حول الشمس . ولم تعرف حتى الآن أية مجموعة فلكية شبيهة بالمجموعة الشمسية ، ولكن يوجد عدد كبير مما يسمى بالنجوم المزدوجة . والنجم المزدوج هو عبارة عن نجمين يتحركان حول نقطة تسمى بمركز ثقلهما . وقد أثبتت مشاهدات حركة هذه النجوم المزدوجة صحة قانون نيوتن للجاذبية . دعنا نفرض الآن أن سرعة الضوء تتوقف على سرعة مصدره ، فيستنتج من ذلك أن الإشارة أو الشعاع الضوئى القادم من النجم سيتحرك بسرعة أو يبطء حسب قيمة سرعة النجم عند لحظة إرسال الشعاع . وفى هذه الحالة تصبح الحركة (كما نشاهدها) مضطربة ، ويصبح من المستحيل فى حالة النجوم المزدوجة تحقيق قانون الجاذبية التي تسير بمقتضاها مجموعتنا الشمسية .

ولنعتبر تجربة أخرى مبنية على فكرة بسيطة . لتتصور عجلة تدور بسرعة كبيرة ، فطبقا لافتراضنا سيتحرك الأثير مع العجلة المتحركة . فإذا صرت الآن موجة ضوئية قريبا من العجلة الدائرة فإن سرعتها ستتوقف على ما إذا كانت العجلة ساكنة أو متحركة ، حيث أن سرعة الضوء في الأثير الساكن تختلف عن قيمتها في الأثير الذى تدفعه العجلة على الدوران معها ، تماما كما تختلف سرعة الصوت عندما يكون الهواء ساكنا عن قيمتها عند ما تهب رياح عاصفة . ولكننا لم تتمكن عمليا من ملاحظة أى فرق في سرعة الضوء مهما أعدنا من تجارب دقيقة وكانت النتيجة باستمرار ضد الفرض بحركة الأثير . ويمكننا الآن ذكر النتائج التالية التى تؤيدها جميع الاعتبارات والأدلة العلمية .

لا تتوقف سرعة الضوء على حركة مصدر الضوء .

لا يصح لنا أن نفرض أن الأجسام المتحركة تحمل الأثير المحيط بها .

وإذن يجب علينا أن ننبد جانبا فكرة التشابه بين أمواج الصوت وأمواج الضوء ، وأن نبدا بدراسة الاحتمال الثانى الذى ينص على أن المادة تتحرك خلال الأثير الذى لا يتأثر بتاتا بحركة الأجسام . أى أننا سنفرض وجود بحر من الأثير يحوى كل الاحداثيات سواء أكانت ساكنة أم متحركة بالنسبة إليه . ولنهمل الآن مؤقتا السؤال عما إذا كانت التجارب العملية قد أثبتت صحة هذا الفرض أو عدم صحته ، إذ أنه من الأفضل أن نفهم معنى هذا الفرض الجديد والنتائج التى يمكننا استخلاصها منه .

وهناك مجموعة احداثية ساكنة بالنسبة إلى هذا البحر الأثيرى . ولا يمكننا — فى الميكانيكا — التفرقة بين مجموعة وأخرى من بين المجموعات الإحداثية التى تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها ، وإذن تعتبر جميع هذه المجموعات متشابهة فى كل شئ . وإذا كان لدينا مجموعتان احداثيتان متحركتان بالنسبة لبعضهما بسرعة منتظمة فإنه ليس هناك معنى فى الميكانيكا للتساؤل عن أيهما المتحرك وأيها الساكن حيث أن السرعة النسبية هى التى يمكننا مشاهدتها فقط . ولن نستطيع التحدث عن الحركة المنتظمة المطلقة بسبب قاعدة جاليليو النسبية . ما هو معنى القول بأن

للحركة المطلقة - فضلا عن الحركة النسبية - وجود ملموس ؟ الجواب ببساطة هو أن هناك مجموعة احداثية تكون فيها القوانين الطبيعية مختلفة عن مثيلاتها في المجموعات الاحداثية الأخرى ، وتعنى كذلك أن المشاهد يستطيع أدراك ما إذا كانت مجموعته الاحداثية متحركة أم لا بمقارنة القوانين المتحققة في مجموعته بمثيلاتها في مجموعة الاحداثيات الوحيدة التي يمكننا اتخاذها كمجموعة قياسية . وتعتبر هذه الاعتبارات غير مألوفة في الميكانيكا الكلاسيكية حيث ليس هناك أى معنى للكلام عن الحركة المنتظمة المطلقة بمقتضى قانون جاليليو للقصور الذاتى .

« ماهى الاستنتاجات التي يمكننا الحصول عليها من ظواهر المجال ، إذا فرضنا الحركة فى الأثير ؟ وهذا يعنى أن هناك مجموعة احداثية واحدة مميزة وثابته بالنسبة للبحر الأثيرى . ومن الطبيعى أنه يجب أن تأخذ بعض قوانين الطبيعة صوراً مختلفة فى هذه المجموعة وإلا فلا معنى للعبارة « الحركة خلال الأثير » وإذا كانت قاعدة جاليليو النسبية صحيحة فلن يكون هناك معنى للحركة خلال الأثير ؛ إذ أن التوفيق مستحيل بين الفكرتين . فإذا وجدت مجموعة احداثية خاصة مثبتة فى الأثير فإنه يحق لنا الكلام عن الحركة أو السكون المطلقين .

وفى الحقيقة أنه ليس من حقنا أن نختار ، فقد حاولنا جاهدين إنقاذ قاعدة جاليليو النسبية بفرض أن المجموعات الأحداثية تحمل الأثير معها فى حركتها ، ولكن ذلك أدى إلى التعارض مع التجارب العملية ، فلم يصبح أمامنا إذن سوى أن ننبد قاعدة جاليليو النسبية ونعتبر الفرض القائل بأن جميع الأجسام تتحرك خلال البحر الأثيرى الساكن .

وسندرس الآن بعض الاستنتاجات المعارضة لقاعدة جاليليو النسبية والتي تؤيد فكرة الحركة خلال الأثير ، وسنتخيل الآن بعض تجارب تجريها على هذه الاستنتاجات ، بغض النظر عن الصعوبات العملية التي تحول دون تحقيق هذه التجارب ، حيث أن ما يعيننا الآن هى النظريات وليست الصعوبات العملية .

سنعود الآن مرة ثانية إلى حجرتنا السريعة الدوران وإلى المشاهدين الخارجى والداخلى . من الطبيعى أن يتخذ المشاهد الخارجى البحر الأثيرى كمجموعة

أحداثياته ، وهى المجموعة المميزة التى تبلغ فيها سرعة الضوء قيمتها القياسية .
وسترسل جميع المصادر الضوئية — الساكنة والمتحركة فى البحر الأثيرى —
الضوء منتشراً بنفس السرعة القياسية . لنفرض أن الحجرة وبها المشاهد الداخلى
تتحرك خلال الأثير وبأن جدرانها شفافة بحيث تمكن المشاهدين الخارجى
والداخلى من قياس سرعة الضوء عند توليد إشارة ضوئية وسط الحجرة . فإذا
سألنا كلا المشاهدين عن نتائج قياسهما لاقتربت إجابتهما مما يلى :

المشاهد الخارجى : حيث أن مجموعة أحداثياتى مثبتة فى البحر الأثيرى فإن
الضوء سيكون له نفس السرعة القياسية ، ولن يعينى ما إذا كان مصدر الضوء
متحركاً أم لا ، حيث أن الأثير ثابت لا يتحرك . إن أحداثياتى مميزة عن جميع
الأحداثيات الأخرى ويجب أن يكون لسرعة الضوء فيها القيمة القياسية بغض
النظر عن اتجاه الأشعة أو حركة المصدر .

المشاهد الداخلى : تتحرك حجرتى خلال البحر الأثيرى ولذلك فإن أحد
جدران حجرتى سيبتعد عن الضوء المشع فى حين يقترب منه الجدار المقابل . فإذا
كانت حجرتى متحركة فى الأثير بسرعة الضوء نفسه فإن الإشارة الضوئية
الصادرة من مركز الحجرة لن تصل أبداً إلى الجدار المبتعد بسرعة الضوء عن
الإشارات الضوئية المنبعثة . أما إذا تحركت الحجرة بسرعة أقل من سرعة الضوء
فإن موجة صادرة من وسط الحجرة ستصل إلى أحد جوانبها قبل الأخرى ، إذ
أن الضوء سيصل إلى الجانب المقرب منه قبل أن يلحق بالجانب المتراجع أمامه
من الناحية الأخرى . وإذن على الرغم من أن مصدر الضوء مثبت فى مجموعة
أحداثياتى فإن سرعة الضوء لن تكون لها نفس القيمة فى جميع الاتجاهات أى
أنها ستكون أصغر قيمة فى اتجاه حركة الحجرة بالنسبة إلى البحر الأثيرى لأن
الجدار فى هذه الحالة سيكون مبتعداً عن الضوء المنبعث ، وستكون قيمتها أكبر
فى الاتجاه المضاد لأن الجدار سيقرب من موجات الضوء متلهفاً على لقاءها .

ومن ذلك نستنتج أن سرعة الضوء سيكون لها نفس القيمة فى جميع
الاتجاهات فقط فى حالة المجموعة الأحداثية المميزة والمثبتة فى البحر الأثيرى ، أما

في باقى المجموعات المتحركة بالنسبة إلى البحر الأثيرى فإن السرعة ستتوقف على الاتجاه الذى تقاس فيه السرعة .

وإجراء مثل هذه التجربة السابقة يمكننا من اختبار صحة نظرية الحركة خلال الأثير .

وقد سهلت علينا الطبيعة الأمر بأن وضعت تحت تصرفنا مجموعة متحركة بسرعة مرتفعة جداً ، ونعنى بذلك الكرة الأرضية فى حركتها السنوية حول الشمس . فإذا كانت نظريتنا صحيحة وجب أن تكون سرعة الضوء فى اتجاه حركة الأرض مختلفة عنها فى الوضع العكسى . وفى إمكاننا تقدير هذا الفرق فى السرعة وإعداد تجارب عملية لتقدير قيمته . ومن الطبيعى أن مثل هذه التجارب يجب أن تكون غاية فى الدقة بسبب صغر الفترات الزمنية التى يجب علينا قياسها . وقد توافرت شروط الدقة فى تجربة ميكلسون ومورلى التى وضعت لقياس الاختلاف فى سرعة الضوء بالنسبة لحركة الأرض فى مدارها . وقد كانت نتيجة هذه التجربة قاضية على نظرية البحر الأثيرى الساكن الذى تتحرك خلاله الأجسام ، إذ لم يظهر وجود أية علاقة بين سرعة الضوء واتجاه حركة المصدر . وليست سرعة الضوء هى الكمية الوحيدة التى يجب أن تتوقف على حركة المجموعة الأحداثية ، على أساس نظرية البحر الأثيرى الساكن ، بل هناك كميات مجالية أخرى . وقد باءت بالفشل جميع التجارب التى أجريت بقصد إدراك وجود أى فرق فى سرعة الضوء ولم تصب أى نجاح على الإطلاق فى إظهار ما يثبت وجود أى تأثير لحركة الكرة الأرضية على الظواهر الطبيعية .

وقد أصبحنا الآن فى موقف حرج ! فقد حاولنا وضع فرضين ، ينص الأول . على أن الجسم المتحرك يحمل الأثير معه ، ولكن عدم توقف سرعة الضوء على حركة مصدره يناقض هذا الفرض ؛ وكان الفرض الثانى يقول بوجود مجموعة أحداثية مميزة وبأن الأجسام المتحركة لا تحمل الأثير معها . بل تتحرك خلال بحر أثيرى ساكن ، وقد أدى هذا الفرض إلى عدم صحة قاعدة جاليليو النسبية وبأن

سرعة الضوء لا يمكن أن تكون لها نفس القيمة في كل المجموعات الأحداثية .
ولكن هذا يتعارض أيضاً مع التجارب العملية .

وقد ظهرت بعد ذلك نظريات كثيرة بنيت على الاعتقاد بأن الحقيقة قد تكون
في فرض ينحصر بين الفرضين السابقين ، ويتلخص في أن الأثير يتحرك جزئياً
فقط مع الأحداثيات المتحركة . ولكن جميع هذه الفروض باءت بالفشل ! ولم
تنجح كل المحاولات التي بذلت لشرح الظواهر الكهرومغناطيسية في المجموعات
الأحداثية سواء أكان ذلك بفرض حركة الأثير أو بكلا الفرضين معاً .

وأدى ذلك كله إلى أن أصبح العلم في موقف يعتبر من أخرج المواقف التي
مرت عليه في تاريخه الطويل ، إذ أن جميع فروض الأثير لم تؤد إلى نتيجة ما !
وكانت أحكام التجارب العملية دائماً ضد جميع الافتراضات والتأويلات . وإذا
أمعنا النظر الآن فيما سبق بسطه من تطورات علم الطبيعة فإننا نرى أن الأثير
— عقب ولادته فوراً — قد أصبح مصدر تعب للعائلة الطبيعية . فقد أسبغ عليه
العلماء الوصف اليكانيكي أولاً ، ولكن سرعان ما نبذ . ثم رأينا بعد ذلك كيف
فقدنا الأمل في نجاح الفرض بوجود بحر أثيري ساكن وتميز مجموعة أحداثية
تمكننا من تعريف الحركة المطلقة فضلاً عن الحركة النسبية المعروفة ، وقد كانت
هذه تكفي لتبرير فرض وجود الأثير (فضلاً عن وظيفته في حمل الأمواج) .
وهكذا فشلت جميع المحاولات لجعل الأثير حقيقة ، فلم نلمس له أية خواص
ميكانيكية ولم نستطع اكتشاف أو تعريف الحركة المطلقة . ولم يبق لدينا من جميع
الصفات التي أضفيت على الأثير سوى تلك التي اخترع من أجلها ، ألا وهي قدرته
على حمل وإرسال الموجات الكهرومغناطيسية . ولعل المصاعب التي لا قيناها بسبب
الأثير تدفعنا إلى أن نطرده من غيبتنا ونحرم على أنفسنا حتى مجرد ذكره .
وسنقول بعد ذلك أن فضاء كوننا له الخاصية الطبيعية التي تمكنه من إرسال
الأمواج ، وبهذه الطريقة نتجنب أنفسنا استخدام الكلمة التي قررنا حذفها .
ومن الطبيعي أن حذف كلمة من قاموسنا ليس علاجاً ، فمتاعبنا في الحقيقة تبلغ
من الفداحة حداً لا تحله مثل هذه الطريقة .

ولنسجل الآن الحقائق التي أثبتت التجارب صحتها دون أن نحفل بعد ذلك بتاتاً بمتاعب الأثير :

١ — تبلغ سرعة الضوء دائماً قيمتها القياسية ، ولا تتوقف على حركة مصدر الضوء أو جهاز استقباله .

٢ — تتحقق جميع القوانين الطبيعية في مجموعتين أحداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما ، ولا توجد هناك طريقة لتمييز الحركة المنتظمة المطلقة .

وهناك تجارب كثيرة لتأييد هاتين النتيجةين ولكن ليست هناك تجربة واحدة لنقضهما . وتعتبر النتيجة الأولى عن استمرار ثبوت سرعة الضوء ، وتعمم الثانية قاعدة جاليليو النسبية — التي وضعت للظواهر الميكانيكية — لكي تشمل جميع الظواهر الطبيعية .

وقد رأينا في الميكانيكا إذا كانت سرعة النقطة المادية تبلغ قدراً معيناً بالنسبة لمجموعة أحداثية فإن قيمتها بالنسبة لمجموعة أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى تصبح مختلفة . وهذا ناتج من قواعد التحويل الميكانيكية البسيطة . ومن السهل الاهتداء إلى هذه القواعد بالفطرة (حركة بحار بالنسبة إلى سفينة ثم بالنسبة إلى الشاطئ) . وقد يخيل إلينا أن هذا القانون ليس به أى خطأ ولكنه في الحقيقة يتعارض مع ثبوت سرعة الضوء . أى أننا إذا أضفنا النتيجة التالية :

٣ — يمكن تحويل الأوضاع والسرع من مجموعة أحداثية إلى أخرى بواسطة قانون التحويل الكلاسيكي . فإن التناقض يصبح واضحاً ، إذ أننا لا يمكننا أن نجتمع بين النتائج (١) ، (٢) ، (٣) .

ووضوح التحويل الكلاسيكي وبساطته يستبعدان أى محاولة لتغييره ، حتى نستطيع القضاء على التناقض الموجود بين (١) ، (٢) من جهة أخرى .

وقد سبق أن رأينا كيف عارضت التجارب العملية أى تغيير في النتيجةين (١) ، (٢) ، حيث أن جميع النظريات المتعلقة بحركة الأثير تطلبت تغيير هذين

النتيجتين . وهكذا نلمس مرة أخرى فداحة مصاعبنا وأنا في حاجة ماسة إلى دليل يهديننا إلى الطريق القويم . ويبدو أن هذا الطريق هو أن نقبل الفرضين الأساسيين (١) ، (٢) ونبتدئ — على الرغم مما قد يبدو من غرابة ذلك — الفرض الثالث . ويبدأ هذا الطريق الجديد من تحليل المعتقدات الأولية والأساسية ، وسنرى كيف يضطرنا هذا التحليل إلى تغيير آرائنا القديمة ويمكننا من التغلب على مصاعبنا .

الزمن والمسافة والنسبية :

لنضع الآن الفرضين التاليين :

١ — لسرعة الضوء في الفراغ نفس القيمة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها بسرعة منتظمة .

٢ — القوانين الطبيعية واحدة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها .

وتبدأ نظرية النسبية بهذين الفرضين ، ولن نستخدم فيما يلي التحويلات الكلاسيكية لأننا نعلم مما سبق أنها تتعارض مع فرضينا .

ومن الضروري هنا كما هي الحال في العلم دائماً أن نتخلص من تحيزنا إلى نظرية بالذات ، ونظراً إلى أننا رأينا أن أى تغيير في (١) ، (٢) يؤدي إلى التعارض مع التجارب العملية فإنه يجب أن تكون لدينا الشجاعة لكي نعلن صحة هذين الفرضين ، ثم نركز بعد ذلك جل اهتمامنا بنقطة الضعف المحتملة ، ألا وهي الطريقة التي تتحول بها الأوضاع والسرع من مجموعة إحداثية إلى أخرى . وسنمضي الآن في استخراج بعض النتائج من (١) ، (٢) ثم دراسة تعارض الفرضين السابقين مع التحويلات الكلاسيكية والبحث عن المعاني الطبيعية للنتائج التي نحصل عليها .

وسنعود الآن مرة أخرى إلى الحديث عن الحجرة المتحركة ذات الشاهدين الخارجى والداخلى وسنفرض أن إشارة ضوئية قد أرسلت من وسط الحجرة ، ولنسأل الآن الشاهدين عما ينتظر أن يشاهدا على أساس الفرضين السابقين ، مع غرض النظر عما سبق قوله عن الوسط الذى ينتقل الضوء خلاله . وسنذكر فيما يلى إجابة الشاهدين :

الشاهد الداخلى : ستصل الإشارة الضوئية المنبعثة من وسط الحجرة إلى جدرانها فى نفس اللحظة ، لأنها تبعد نفس المسافة عن مصدر الضوء ولأن سرعة الضوء ثابتة فى جميع الاتجاهات .

الشاهد الخارجى : ستكون سرعة الضوء فى مجموعتى هى نفسها تلك التى أدركها الشاهد فى المجموعة المتحركة ، ولا يعينى ما إذا كان مصدر الضوء يتحرك فى مجموعة إحداثية أم لا ، لأن حركته لن تؤثر فى سرعة الضوء على الإطلاق . وكل ما أراه هو إشارة ضوئية متحركة بالسرعة القياسية الثابتة فى جميع الاتجاهات . وأشاهد إحدى جوانب الحجرة تحاول الابتعاد عن الإشارة الضوئية فى حين أن الجانب الآخر يقترب منها ، ولذا فإن الضوء سيصل إلى الجانب الأخير قبل وصوله إلى الأول بلحظات صغيرة جداً إذا كانت سرعة الحجرة صغيرة القدر بالنسبة إلى سرعة الضوء .

ومقارنة استنتاجات هذين الشاهدين تثير الدهشة حقاً ، فإنها تتعارض صراحة مع آراء ومعتقدات علم الطبيعة الكلاسيكى التى ظن العلماء أن أسسه فوق كل شك . فنجد مثلاً أن حدثين (أى شعاعين ضوئيين) متحركين بين حائطين يستغرقان وقتاً واحداً بالنسبة لمشاهد مقيم فى نفس المجموعة ويستغرقان وقتين مختلفين بالنسبة لمشاهد آخر خارج الغرفة مع العلم بأن سرعة الضوء ثابتة فى الحالتين .

وقد كان لدينا فى علم الطبيعة الكلاسيكى ساعة واحدة وزمن واحد للمشاهدين فى جميع المجموعات الإحداثية ، فقد كان للزمن وبالتالى ، للقول بأن حدثين وقعا فى آن واحد أو أن أحدهما وقع قبل الآخر أو بعده ، كان لهذه العبارات معان مطلقة

لا تتوقف على أية مجموعة إحدائية . فإذا وقع مثلاً حدثان في وقت واحد في مجموعة إحدائية معينة فإنهما يجب أن يظلا كذلك في جميع المجموعات الإحدائية الأخرى . وينتج من ذلك أن الفرضين السابقين (١) ، (٢) أو بعبارة أخرى نظرية النسبية ، تدفعنا لتبذ هذا الاعتقاد الكلاسيكي . فقد وصفنا حدثين بأنهما وقعا في لحظة واحدة في مجموعة إحدائية ورآهما مشاهد آخر في مجموعة أخرى كأنهما حدثا في وقتين مختلفين . فعلينا الآن أن نتفهم هذه النتيجة وندرك معنى الجملة « إذا وقع حدثين في وقت واحد في مجموعة إحدائية فيحتمل ألا يكونا كذلك في مجموعة أخرى » .

ولكن ماذا نقصد بقولنا « حدثين وقعا في وقت واحد في مجموعة إحدائية » ؟ لعله يبدو أن كل إنسان يدرك بالبديهية معنى هذه العبارة . ولكن لتتوخ الدقة في التعريفات التي نقولها بعد أن لمسنا مقدار الخطر الناجم من فرط الثقة بالبديهية . ولنجب الآن على السؤال البسيط : ما هي الساعة ؟

نستطيع بفضل شعورنا الفطري الباطني بمرور الوقت ، ترتيب إحساساتنا والحكم على أن حدثاً ما قد وقع قبل آخر . ولكن لكي نثبت أن الفترة الزمنية بين حدثين هي عشر ثوان مثلاً لا بد لنا من ساعة . وباستخدام الساعة يصبح الزمن شيئاً واقعياً . ويمكننا أن نتخذ من أي ظاهرة طبيعية « ساعة » بفرض أن هذه الظاهرة تكرر نفسها بالضبط مراراً كثيرة . فإذا أخذنا الفترة الزمنية بين بدء ونهاية هذا الحدث (الظاهرة) كوحدة الزمن ، فإننا نستطيع قياس فترات الزمن الاختيارية بتكرار هذه العملية الطبيعية . وجميع الساعات — من الساعة الرملية البسيطة إلى أدق الآلات — مبنية على هذا الأساس ، ففي الساعة الرملية تعرف وحدة الزمن بالفترة التي يأخذها الرمل في التدفق من الزجاج العلوي إلى السفلي .

لنفرض أننا قلنا أن لدينا ساعتين دقيقتين تعطيان نفس الوقت مستقرتان في مكانين بعيدين عن بعضهما . ويجب علينا أن نقبل صحة هذه العبارة بغض النظر عن مقدار الدقة التي نتوخاها في تحقيقها . ولكن دعنا نسأل أنفسنا : ما هو

معناها الحقيقي ؟ كيف يمكننا التأكد من أن ساعتين بعيدتين تعطيان نفس الوقت بالضبط ؟ لعل التليفزيون هو إحدى الطرق التي يمكننا استخدامها لإثبات ذلك . ويجب أن نفهم أن جهاز التليفزيون سيستخدم كثال فقط وأنه ليس أساسياً لدراستنا . وأستطيع الآن أن أقف على مقربة من إحدى الساعتين وأنظر في نفس الوقت إلى صورة الساعة الأخرى في جهاز التليفزيون وبذلك أستطيع أن أحكم عما إذا كانت الساعتان تعطيان نفس الوقت أم لا . ولكن هذه الطريقة ليست سليمة إذ أن صورة الساعة التي ظهرت في جهاز التليفزيون قد حملتها أمواج كهرومغناطيسية متحركة بسرعة الضوء ، وبذلك تكون تلك الصورة التي رأيناها قد أرسلت قبل لحظة رؤيتها بوقت قليل ، هو الوقت الذي أخذه في الانتقال من مكان الساعة الأصلي إلى جهاز التليفزيون ، في حين أن الساعة الثانية تعطينا الوقت الحالي بالضبط . ويمكننا التغلب على هذه الصعوبة بسهولة إذا أخذنا صوراً بالتليفزيون لكل من الساعتين عند نقطة تبعد عن كل منهما بمسافة متساوية ثم نشاهد قراءتهما عندئذ . فإذا كانت الإشارتان قد أرسلتا في نفس الوقت فإنهما سيصلان إلى نقطة المشاهدة في نفس اللحظة أيضاً . أى أننا إذا شاهدنا ساعتين دقيقتين من نقطة في منتصف المسافة بينهما فإنهما سيعطيان نفس الزمن دائماً ، وبذلك يصبحان ملائمين لتعيين أزمنة الأحداث التي تقع عند نقطتين بعيدتين .

وقد سبق أن استخدمنا ساعة واحدة في الميكانيكا ولكنها لم تكن جديلاً ملائمة ، إذ أنه كان علينا أن نقوم بكل قياساتنا على مقربة من هذه الساعة الوحيدة وإذا نظرنا إلى ساعة موضوعة على بعد كبير خلال جهاز التليفزيون مثلاً فإنه يجب علينا أن نتذكر دائماً أن ما نراه الآن قد حدث فعلاً في وقت مضى ، كما هي الحال عندما نشاهد غروب الشمس ، إذ أن ما نشاهده يكون قد وقع فعلاً قبل ثمان دقائق من لحظة المشاهدة . وإذن يجب علينا أن نقوم بتصحيحات لكل تقديراتنا الزمنية بمقادير تتوقف على بعدنا من الساعة .

ويتضح مما سبق أنه من غير المناسب ألا يكون لدينا سوى ساعة واحدة .
والآن وقد عرفنا كيف نستطيع الحكم على أن اثنتين أو أكثر من الساعات نعطينا:

نفس الزمن ، وتسير بنفس الطريقة ، فإننا يمكننا أن نتصور أن لدينا عدداً كبيراً من الساعات في إحدى المجموعات الاحداثية . وستمكنا هذه الساعات من تقدير أزمنة وقوع الأحداث التي تقع بقربها ، وسنفرض أن كل هذه الساعات غير متحركة بالنسبة لهذه المجموعة الاحداثية . وبذلك تتوفر لدينا مجموعة من الساعات الدقيقة المضبوطة التي تعطينا نفس قراءة الزمن في نفس اللحظة .

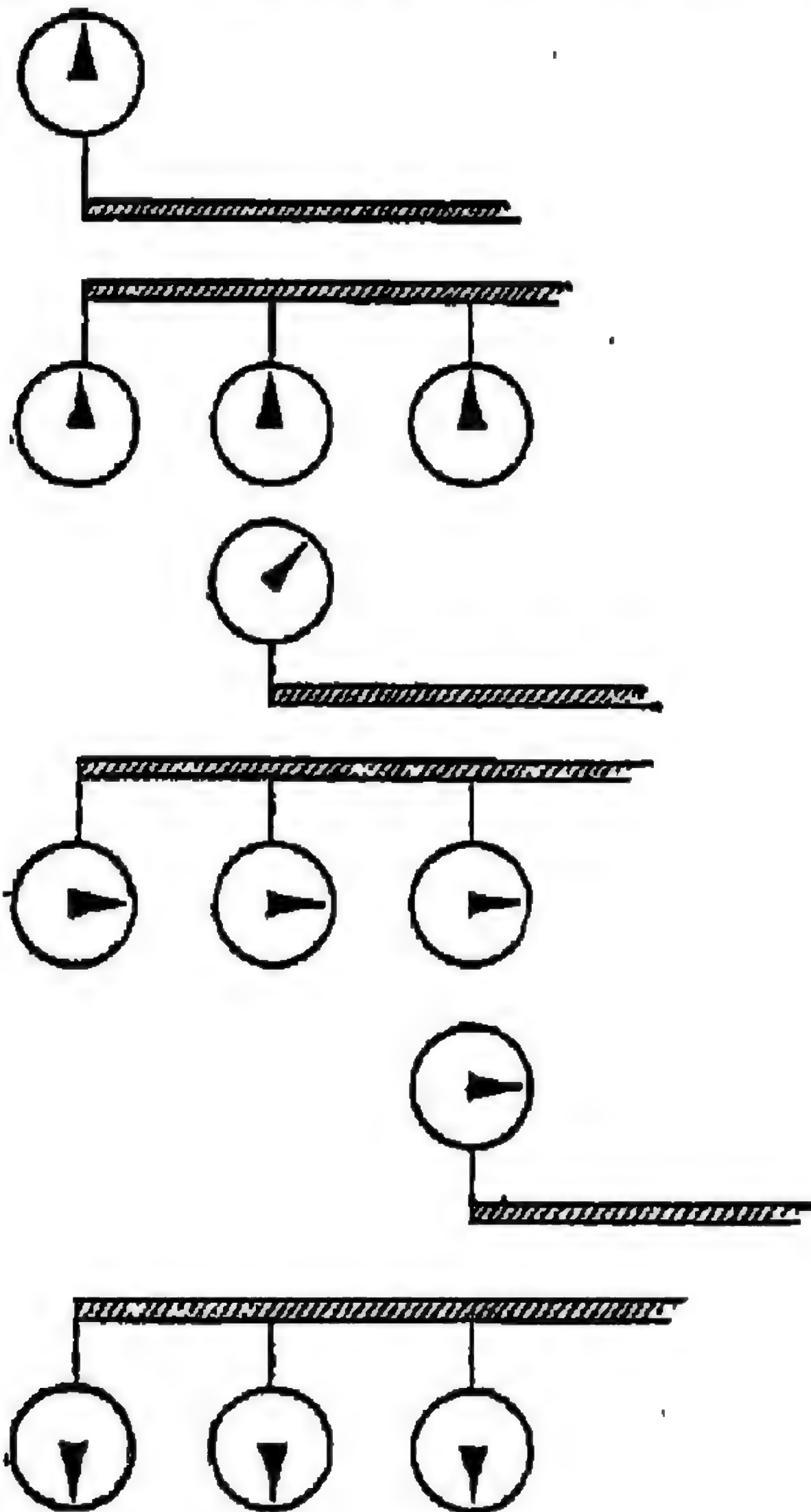
وليس فيما فعلناه من وضع هذه الساعات في مجموعتنا الاحداثية ، ما يستحق أن يثير دهشتنا إذ أننا الآن نستطيع أن نقرر ما إذا كان حدثان بعيدان قد وقعا في نفس الوقت أم لا بالنسبة لمجموعة إحداثية معينة ، فإذا أعطت الساعتان القريبتان من هذين الحدثين نفس القراءة عند وقوع الحدثين أمكننا أن نجزم بأنهما قد وقعا في نفس الوقت ، وكذلك أيضاً يصبح في مقدورنا أن نقول بأن أحد الحدثين قد وقع قبل الآخر . وكل هذا بفضل الساعات المضبوطة المثبتة في مجموعتنا الإحداثية .

ونحن فيما سبق لم نخرج عن نطاق علم الطبيعة الكلاسيكي وليس في النظام الذي وضعناه أي تناقض مع التحويلات الكلاسيكية . وقد استخدمنا الإشارات الضوئية لضبط ساعاتنا أثناء تعريفنا للأحداث الآتية . وتلعب سرعة الضوء - التي تتحرك بها هذه الإشارات - دوراً أساسياً في النظرية النسبية .

وحيث أننا معنيون بدراسة حركة مجموعتين احداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما ، فيجب علينا أن نعتبر قضيبين مثبت بكل منهما مجموعة من الساعات ، وبذا يتوفر لكل من المشاهدين الموجودين بالمجموعتين المتحركتين قضيب القياس ، ومجموعة الساعات المثبتة به .

وأثناء دراستنا لعملية القياس في الميكانيكا الكلاسيكية ، استخدمنا ساعة واحدة لجميع المجموعات الاحداثية ، في حين أن لدينا الآن ساعات كثيرة في كل مجموعة إحداثية وليس هذا الفرق بذى أهمية إذ أن ساعة واحدة تكفي ولكننا لا نستطيع الاعتراض على استخدام ساعات كثيرة مادامت كلها مضبوطة ومتجانسة وتعطي نفس الوقت للأحداث الآتية .

ونحن الآن نقرب من النقطة الأساسية التي تتعارض فيها قوانين التحويل الكلاسيكي مع نظرية النسبية . ماذا يحدث عندما تتحرك مجموعة الساعات بانتظام بالنسبة إلى مجموعة أخرى ؟ سوف يجيب عالم الطبيعة الكلاسيكية بقوله : سوف لا يجد علينا شيء ، فستظل الساعات كما لو كانت ساكنة بالنسبة لبعضها ، وستعطينا نفس الزمن بغض النظر عن حركتها ، ونخبرنا الطبيعة الكلاسيكية بأنه إذا وجد حدثان آنيان في مجموعة إحداثية واحدة فإنهما سيظلان كذلك في أي مجموعة أخرى . ولكن هذه ليست هي الإجابة الوحيدة ، إذ يمكننا أن نتخيل للساعة المتحركة توقيتاً يختلف عن توقيت الساعة الساكنة . ولندرس الآن هذا الاحتمال ، دون أن نتخذ لأنفسنا قراراً فيما إذا كانت الحركة تؤثر حقاً في تقدير الساعة للوقت . ولنبدأ بشرح ماذا نعني بقولنا أن حركة الساعة تؤثر في تقديرها للوقت ؟ ولنفرض للسهولة أن لدينا ساعة واحدة مثبتة في مجموعة إحداثية عليا وأخرى مثبتة في



المجموعة الإحداثية السفلى وأن لكل الساعات نفس التركيب الميكانيكي الداخلي وأنها مضبوطة تعطى نفس القراءة للحوادث الآنية عند ثبوت المجموعتين الإحداثيتين بالنسبة لبعضهما . وسيوضح الشكل المرافق ثلاثة أوضاع متتالية للمجموعتين الإحداثيتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما .

وقد كان المفروض ضمناً في الميكانيكا الكلاسيكية أن حركة الساعة لا تؤثر أبداً في نظام تقديرها للوقت . وقد كان هذا مفروضاً كبدئية لا تستحق حق مجرد الذكر . ولكن لا يجب

علينا — إذا أردنا الدقة — أن نمضى في تحليل هذا الافتراض الذى سبق الأخذ به كقضية مسلمة في علم الطبيعة .

ولا يجب علينا نبذ فرض ما لمجرد أنه يختلف عما ألفناه في الطبيعة الكلاسيكية فيمكننا مثلاً أن نتصور أن ساعة متحركة تغير نظام توقيتها ؛ ما دام القانون الذى يحدد هذا التغير ، ينطبق على جميع المجموعات الإحداثية القاصرة .

لنعتبر الآن مثلاً آخر . لنفرض أن لدينا عصا ، يبلغ طولها ياردة واحدة . عند ما تكون ساكنة في مجموعة إحداثية ما . لنفرض أن هذه العصا قد أخذت في التحرك بانتظام منزقة على القضيب الذى يمثل المجموعة الإحداثية . فهل سيظل طولها ياردة أيضاً ؟ قبل الإجابة على هذا السؤال يجب علينا أن نعرف كيف يمكننا تعيين طول العصا . عند ما تكون العصا في حالة سكون سينطبق طرفاها مع علامتين — على قضيب المقياس — يحصران بينهما طولاً قدره ياردة واحدة في المجموعة الإحداثية (أى قضيب المقياس) ، وبهذه الطريقة استنتجنا أن طول العصا يبلغ ياردة واحدة . ولكن كيف يمكننا الآن قياس طولها أثناء حركتها ؟ يمكننا عمل ذلك بالطريقة التالية : عند لحظة معينة يأخذ مشاهدان صورتين فوتوغرافيتين ، إحداها لأحد طرفي العصا والأخرى للطرف الآخر ، وحيث أن الصورتين قد أخذتا في نفس الوقت فإننا يمكننا مقارنة العلامات على قضيب المجموعة الإحداثية الذى ينطبق عليه طرفا العصا ، وبهذه الطريقة نعين طولها . ولا بد من وجود مشاهدين ليلاحظا الأحداث التى تقع في نفس الوقت في أجزاء مختلفة من مجموعتنا الإحداثية . وليس هناك ما يحملنا على الاعتقاد بأن نتيجة مثل هذه القياسات ستتنفق مع تلك التى وجدناها مثلاً في حالة العصا الساكنة . وبما أن هذه الصور الفوتوغرافية يجب أن تؤخذ في نفس الوقت ، وهذا — كما نعرف الآن — يتوقف على المجموعة الإحداثية المتبعة ، فإنه يبدو جديحاً إن نتأجج هذه القياسات ستختلف باختلاف المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها .

ويمكننا الآن أن نتصور بسهولة إنه ليس الساعة المتحركة وحدها هى التى تغير توقيتها ، بل إن العصا المتحركة ستغير طولها أيضاً ، ما دامت قوانين

التغير تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة .

وكنا ندرس حتى الآن احتمالات جديدة دون أن نعطي أى مبررات لفرضها .

ولعلنا نذكر أن سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة وأن من المستحيل التوفيق بين هذه الحقيقة وبين التحويلات الكلاسيكية . والآن دعنا نتساءل عما إذا كان في الإمكان أن يؤدي الفرض بالتغير في نظام توقيت الساعة المتحركة وفي طول القضيب المتحرك إلى الفرض بثبات سرعة الضوء ؟ إن ذلك ممكن حقاً ! وهذه هي الحالة الأولى التي تختلف فيها النظرية النسبية مع الطبيعة الكلاسيكية اختلافاً أساسياً . ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة بالطريقة العكسية التالية ! إذا كانت سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الأحداثية فإن القضبان المتحركة تعاني تغيراً في أطوالها وكذلك يتغير نظام توقيت الساعات المتحركة ، ويمكننا استنتاج القوانين التي تتحكم في هذه التغيرات .

وليس في ذلك أى غموض أو عدم تماس مع المنطق . فقد كان المفروض دائماً في الطبيعة الكلاسيكية أن نظام التوقيت واحد للساعات المتحركة والساكنة على حد سواء ، وأن للقضبان المتحركة والساكنة نفس الأطوال ! فإذا كانت سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الأحداثية ، أى إذا كانت نظرية النسبية صحيحة فإنه يجب علينا التضحية بهذا الفرض . ونعلم أنه من الصعب التخلص من العقائد والآراء المتأصلة في النفس ، ولكن ماذا نفعل وليس أمامنا طريق آخر ؟ ومن وجهة نظر النظرية النسبية تبدو الآراء القديمة اختيارية . فلماذا نعتقد — كما فعلنا سابقاً — في الزمن المطلق وثبوته بالنسبة لجميع المشاهدين في كل المجموعات الإحداثية ؟ ولماذا نعتقد في ثبوت الأطوال وعدم قابليتها للتغير ؟ فالزمن يتعين باستخدام الساعات ، والأطوال بالقضبان ، ويمكن أن تتوقف نتائج قياساتها على خواص الساعات والقضبان أثناء حركتها ، وليس هناك ما يبرر الاعتقاد بأن هذه النتائج والعمليات ستسير على النمط الذي نوده ! وقد أرتنا المشاهدات — بطريق غير مباشر — خلال ظواهر المجال الكهرومغناطيسي أن الساعة المتحركة تغير معدل توقيتها وأن القضيب يغير طوله ، على حين أننا لم نتوقع حدوث ذلك على

أساس الظواهر الميكانيكية . ويجب أن نقبل فكرة الزمن النسبي في كل مجموعة إحدائية لأنها أفضل طريقة للتخلص من متاعبنا . وقد أظهر التقدم العلمى الناتج من نظرية النسبية ، أننا لا يجب أن ننظر إلى هذا التطور الجديد فى المعتقدات كضرورة لا بد منها حيث أن مميزات النظرية الجديدة قد أصبحت ظاهرة للعيان .

وكنا نحاول فيما سبق إيضاح الدوافع التى أدت إلى الفروض الأساسية لنظرية النسبية ، وكيف أن النظرية قد اضطرتنا إلى مراجعة وتغيير التحويلات الكلاسيكية باعتبار الزمن والمكان على أسس جديدة . ولسنا نهدف إلا إلى إيضاح الآراء التى تكون أسس وجهة نظر طبيعية وفلسفية جديدة . وهذه الآراء بسيطة ، ولكنها — على الصورة التى صيغت فيها هنا — لا تكفى لكى نحصل منها على استنتاجات نوعية أو كمية . وهنا يجب علينا أن نستخدم الطريقة القديمة لشرح الآراء الأساسية فقط مكتفين بذكر بعض الآراء الأخرى دون أى برهنة .

ولإيضاح الفرق بين وجهة نظر عالم الطبيعة الكلاسيكية الذى سنرمز إليه بالرمز « ب » وهو الذى يعتقد بصحة قوانين التحويل الكلاسيكى ، وبين وجهة نظر عالم الطبيعة الحديثة الذى سنرمز إليه بالرمز « ح » وهو الذى يعتقد فى نظرية النسبية وسنتصور الحديث التالى بينهما :

ب — أنا أومن بقاعدة جاليليو النسبية لأننى أعلم أن قوانين الميكانيكا تتحقق فى مجموعتين إحدائيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما أو بعبارة أخرى إن هذه القوانين تعتبر لازمة بالنسبة للتحويل الكلاسيكى .

ح — ولكن نظرية النسبية يجب أن تنطبق على جميع الإحداثيات فى عالمنا الخارجى ، إذ أن جميع القوانين الطبيعية — وليست فقط قوانين الميكانيكا — يجب أن تتحقق فى جميع المجموعات الإحدائية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض .

ب — ولكن كيف يمكن أن تتحقق جميع القوانين الطبيعية فى جميع الإحداثيات المتحركة بالنسبة لبعضها ؟ فمعادلات المجال — أى معادلات ماكسويل

— ليست لازمة (أى لا تتغير) بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية ، ويظهر هذا بوضوح مع سرعة الضوء ، إذ أن التحويلات الكلاسيكية تنص على أنها يجب ألا تكون ثابتة في كلا المجموعتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما .

ح — إن هذا يثبت أن التحويلات الكلاسيكية لا يمكن استخدامها وأن العلاقة بين المجموعتين الإحداثيتين يجب أن تكون مختلفة ، وأنه يحتمل ألا نربط بين الإحداثيات والسرع بنفس الطريقة المتبعة في التحويلات الكلاسيكية ، التي يجب أن نستبدلها بأخرى جديدة نستنتج من الفروض الأساسية لنظرية النسبية . ولنفرض أننا لا نهتم الآن بالقيم الرياضية لهذه التحويلات الجديدة وأننا نقنع فقط بكونها مختلفة عن التحويلات الكلاسيكية ، وسنسمى هذه التحويلات الرياضية الجديدة بتحويلات لورنتز . ويمكننا إثبات أن معادلات ماكسويل — أى قوانين المجال — لازمة لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز ، تماماً كالزوم قوانين الميكانيكا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . ولندكر كيف كانت هذه التحويلات في الطبيعة الكلاسيكية ، فقد كانت لدينا قوانين تحويل للاحداثيات والسرع وكانت قوانين الميكانيكا لازمة بالنسبة إلى مجموعتين من الإحداثيات متحركة بانتظام بالنسبة لبعضها . وكانت لدينا تحويلات لأوضاع الأجسام فقط ، دون ذكر للزمن ، حيث إن الزمن كان واحداً في جميع المجموعات الأحادية . أما في النظرية النسبية فالوضع جد مختلف فلدينا قوانين تحويل مختلفة عن القوانين الكلاسيكية وخاصة بالأوضاع والزمن والسرعة . ولكننا نكرر أن قوانين الطبيعة يجب أن تتحقق في جميع المجموعات الأحادية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها أى أن هذه القوانين يجب أن تكون لازمة — لا بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية — بل بالنسبة لنوع جديد من التحويلات يسمى بتحويلات لورنتز . وتتحقق جميع القوانين الطبيعية في جميع المجموعات الاحداثية القاصرة ، وتتحول هذه القوانين من مجموعة إلى أخرى بواسطة تحويلات لورنتز .

د — أوافقك على ذلك ولكن يهمنى أن أدرك الفرق بين التحويلات الكلاسيكية وتحويلات لورنتز .

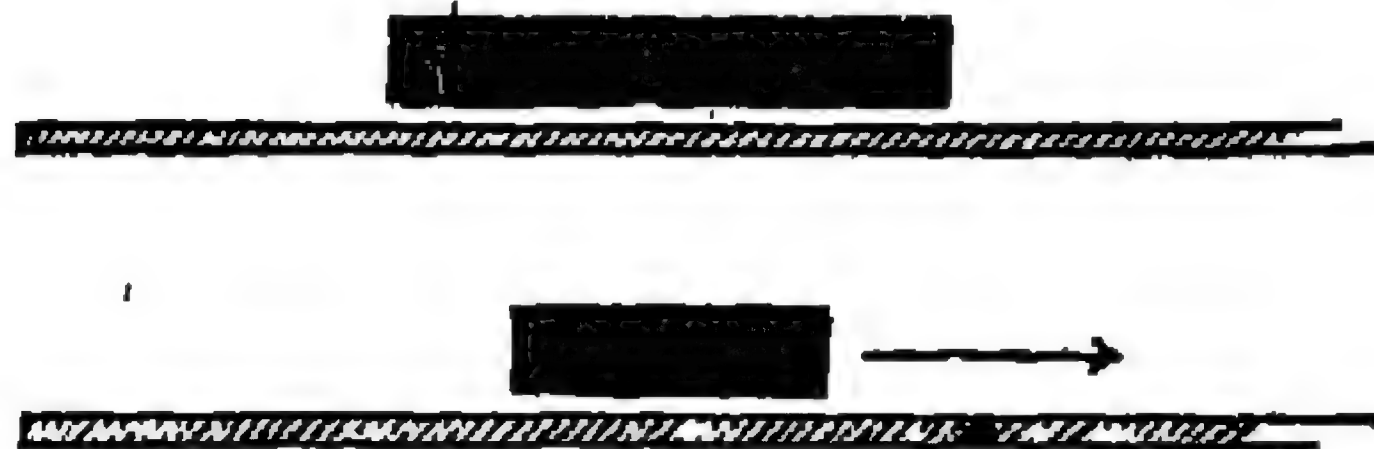
ح — أفضل طريقة للإجابة على سؤالك هي الآتية : أذكر لي أولاً بعضاً من الخواص المميزة للتحويلات الكلاسيكية وسأحاول أن أبين لك ما إذا كانت هذه ستظل صحيحة في حالة تحويلات لورنتز أم لا ، وفي الحالة الأخيرة سأشرح لك كيف تغيرت .

١ — إذا وقع حدث معين عند لحظة معلومة في مجموعة الأحداث فإنه ينتج أن المشاهد في مجموعة أحداثية أخرى متحركة بانتظام بالنسبة لمجموعتي سيحدد رقماً مختلفاً للمكان الذي يقع فيه الحدث ولكن في نفس الوقت بالطبع ، إذ أننا نستخدم نفس الساعة في جميع مجموعتنا الأحداثية ولا يهمنا ما إذا كانت الساعة متحركة — منتقلة — أم لا . فهل هذا صحيح بالنسبة إليك ؟

ح — كلا — هذا ليس بصحيح ، فكل مجموعة أحداثية يجب أن تزود بساعاتها غير المتحركة ، حيث أن الحركة تغير نظام التوقيت . فمشاهدان مثلاً في مجموعتين إحداثيتين مختلفتين سيحددان أرقاماً مختلفة لمكان حدث ما وكذلك رقبين مختلفين للزمن الذي يقع فيه ذلك الحدث .

٢ — هذا يعني أن الزمن ليس لازماً . ففي التحويلات الكلاسيكية كان الزمن واحداً في جميع المجموعات الأحداثية ، أما في تحويلات لورنتز فإنه يتغير ويسلك مسلك الأحداث في التحويلات القديمة . ولا أدري ماذا يحدث للمسافة ؟ ففي الميكانيكا الكلاسيكية يحتفظ قضيب مادي متماسك بطوله في حالتي الحركة والسكون . فهل هذا صحيح الآن أيضاً ؟

ح — كلا — ليس بصحيح . وفي الحقيقة أنه ينتج من تحويلات لورنتز أن العصا المتحركة تتقلص في اتجاه الحركة ، ويزداد التقلص بازدياد السرعة . فكما تحركت العصا بسرعة كلما ظهرت أكثر قصراً . ولكن هذا يحدث فقط في اتجاه الحركة . فأنت ترى في الرسم قضيباً متحركاً يتقلص إلى نصف طوله عندما يتحرك





بسرعة تقترب من 0.90 من سرعة الضوء . هذا في حين أنه ليس هناك تقلص في الاتجاه العمودي على الحركة كما حاولت أن أبين في الرسم .



ب — هذا يعني أن تقدير ساعة متحركة للوقت وكذلك طول عصا متحركة يتوقفان على السرعة ، فكيف يمكن ذلك ؟

ج — يكون هذا التغير واضحاً عندما تزداد السرعة وينتج من تحويلات لورنتز أن العصا تتقلص وينعدم طولها إذا بلغت سرعتها سرعة الضوء . وبالمثل فإن تقدير ساعة متحركة للزمن يقل إذا قورنت بالساعات التي تمر عليها والمثبتة بالقضيب ، وتقف نهائياً عن الدوران إذا تحركت بسرعة الضوء .

د — يبدو لي أن هذا يتعارض مع التجربة ، فنحن نعلم أن السيارة لا تتقلص عندما تتحرك ونعلم أيضاً أن السائق يمكن أن يقارن ساعته بالساعات التي يمر بها . وقد وجدت أنها كلها تتفق مع بعضها خلافاً لما ذكرته لي !

ه — ما قلته صحيح لأريب فيه . ولكنك تلاحظ أن هذه السرعة الميكانيكية صغيرة جداً بالنسبة لسرعة الضوء ، وبذا يصبح من التفاهة تطبيق نظرية النسبية على هذه الظواهر . ويمكن لكل سائق أن يستخدم الطبيعة الكلاسيكية باطمئنان حتى ولو ضاعف سرعته مائة ألف مرة . ويمكننا أن نتوقع الاختلاف بين التجربة وبين التحويلات الكلاسيكية فقط عندما تقترب السرعة من سرعة الضوء . ففي حالة السرعة الكبيرة جداً يمكننا اختبار صحة تحويلات لورنتز .

و — ولكن مع ذلك هناك صعوبة أخرى ، فبمقتضى قواعد الميكانيكا يمكنني تصور أجسام متحركة بسرعة أكبر من سرعة الضوء . فالجسم الذي يتحرك بسرعة الضوء بالنسبة لسفينة متحركة . ستكون سرعته أكبر من سرعة الضوء بالنسبة إلى الشاطئ . فإذا يحدث إذن للعصا التي تقلصت إلى لا شيء عندما

تحركت بسرعة الضوء ؟ فمن الصعب تصور طولاً سالباً ، إذا ازدادت سرعة العصا عن سرعة الضوء .

ج — ليس هناك ما يدعو إلى مثل هذه السخرية ! فعلى أساس نظرية النسبية لا يمكن أن تزيد سرعة الجسم عن سرعة الضوء . فسرعة الضوء هي الحد الأقصى لسرع جميع الأجسام المادية . فإذا كانت سرعة جسم بالنسبة للسفينة هي سرعة الضوء فإنها ستكون لها نفس القيمة بالنسبة للشاطئ . فقانون الجمع والطرح الميكانيكى البسيط لا يتحقق هنا أو على الأصح ينطبق بالتقريب على حالة السرع البسيطة ، ولكن ليس على السرع التى تقترب من سرعة الضوء . وتظهر القيمة العددية لسرعة الضوء بوضوح فى تحويلات لورنتز ، وتعلب دور حالة نهائية ، كالدور الذى تحتله السرعة اللانهائية فى الميكانيكا الكلاسيكية . ولا تتعارض هذه النظرية العامة مع التحويلات الكلاسيكية والميكانيكا الكلاسيكية بل أنها على العكس تتفق مع المعتقدات الكلاسيكية فى الحالة النهائية عندما تكون السرع ذات قيم صغيرة . ويتضح لنا من وجهة نظر النظرية الجديدة ، متى تتحقق النظرية الكلاسيكية وأين يتضح قصورها . وإذن يكون تطبيق نظرية النسبية على حركة السيارات والقطارات مما يدعو حقاً إلى السخرية . تماماً كاستعمال الآلة الحاسبة فى عمليات ضرب بسيطة موجودة فى جدول الضرب .

نظرية النسبية والميكانيكا :

إن الضرورة هى التى أدت إلى نشوء نظرية النسبية ، فضلاً عن التناقض الواضح الكامن فى النظرية القديمة والذى لم نستطع التخلص منه بكل الطرق الممكنة . وتعزى قوة النظرية الجديدة إلى البساطة والدقة التى حلت بهما هذه المشاكل مع استخدام فروض منطقية قليلة . فعلى الرغم من أن النظرية نشأت من مشكلة المجال فإن عليها أن تشمل أيضاً جميع القوانين الطبيعية . وهنا تبدو لنا مشكلة جديدة ، فلقوانين المجال من ناحية وللقوانين الميكانيكية من ناحية أخرى طبيعتان مختلفتان ، فعادلات المجال الكهرومغناطيسى لا تنهيك بالنسبة إلى تحويلات لورنتز

في حين أن المعادلات الميكانيكية لا تتغير بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية .
ولكن النظرية النسبية تدعى أن قوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة
لتحويلات لورنتز وليست بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . وليست هذه الأخيرة
سوى حالة خاصة من تحويلات لورنتز عندما تكون السرعة النسبية للمجموعتين
الاحداثيتين صغيرة جداً . فإذا كانت الحال كذلك فإن الميكانيكا الكلاسيكية يجب
أن تتغير حتى تلائم شروط عدم التغير بالنسبة لتحويلات لورنتز . أو بعبارة
أخرى أن الميكانيكا الكلاسيكية لا يمكن أن تظل حقيقية إذا اقتربت سرعة
التحرك من سرعة الضوء . أى أنه لن تكون هناك سوى تحويلات واحدة من
مجموعة احداثية إلى أخرى . هي تحويلات لورنتز .

وقد كان من السهل تغيير الميكانيكا الكلاسيكية بطريقة لا تتعارض مع النظرية
النسبية من ناحية ، ولأمع مجموعة الحقائق التي حصلنا عليها بالتجربة ، وشرحت
على أساس الميكانيكا الكلاسيكية . فالميكانيكا القديمة تتحقق في حالة السرعة
الصغيرة وبذلك تكون هي الصورة النهائية للميكانيكا الجديدة .

ولعله من المفيد أن نذكر مثلاً للتغير في الميكانيكا الكلاسيكية الحادث بسبب
النظرية النسبية ، ونحاول الحصول على بعض استنتاجات منها ، ثم نبحث فيما
إذا كانت التجارب العملية تؤيد هذه الاستنتاجات أو تنكرها .

لنفرض أن لدينا جسماً ذا كتلة معينة يتحرك على خط مستقيم وتؤثر عليه قوة
خارجية في اتجاه الحركة . فكما نعلم ستتناسب القوة المؤثرة عليه مع معدل التغير
في السرعة وإذن لا يعنينا ما إذا ازدادت سرعة الجسم في الثانية من ١٠٠ إلى ١٠١
قدماً في الثانية أو من ١٠٠ ميل إلى ١٠٠ ميل وقدم واحد في الثانية أو من
١٨٠ ٠٠٠ ميل إلى ١٨٠ ٠٠٠ ميل وقدم واحد في الثانية . فالقوة التي تؤثر على جسم
معين لا تتوقف إلا على معدل التغير في السرعة فقط .

فهل تتحقق هذه الظاهرة أيضاً في النظرية النسبية ؟ كلا .. ؟ فهذا القانون
لا ينطبق إلا على حالات السرعة الصغيرة فقط . ولكن ماهو القانون الذي وضعته
نظرية النسبية في حالة السرعة الكبيرة التي تقترب من سرعة الضوء ؟ . إذا كانت

السرعة كبيرة فلا بد من وجود قوة كبيرة لزيادة مقدارها . فليست القوة التي تسبب زيادة قدم في الثانية للسرعة ١٠٠ قدم في الثانية هي نفسها التي تسبب نفس الزيادة في سرعة تقرب من سرعة الضوء . فكما اقتربت السرعة من سرعة الضوء كلما أصبح من الصعب زيادة قدرها . وعندما تتساوى سرعة الجسم مع سرعة الضوء يصبح من المستحيل زيادتها عن ذلك . وإذن فالتنيرات التي أحدثتها نظرية النسبية ليست من الغرابة في شيء ؛ فسرعة الضوء هي كإقلنا الحد الأقصى لجميع السرع ، وليست هناك أى قوة معينة - مهما زاد قدرها - يمكن أن تسبب أى ازدياد في السرعة عن هذا القدر . وهكذا ، بدلا من القانون الميكانيكي القديم الذي يربط القوة بالتغير في السرعة نحصل على قانون أكثر تعقيداً . ويخيل إلينا - من جهة نظرنا الخاصة - أن الميكانيكا الكلاسيكية بسيطة لأننا في جميع ملاحظتنا وتطبيقاتنا نستخدم سرعاً أقل بكثير من سرعة الضوء .

ويتميز الجسم الساكن بكتلة معينة تسمى بالكتلة الساكنة ، وتفيدنا الميكانيكا بأن كل جسم يقاوم التغير في حركته ، فكما زادت الكتلة ازدادت معها المقاومة وكما قلت الكتلة قلت معها المقاومة . ولكن الوضع جد مختلف في النظرية النسبية فالجسم لا تزداد مقاومته للتغير كلما ازدادت كتلته فقط بل كلما ازدادت سرعته أيضاً ، فالأجسام ذات السرع المقترية من سرعة الضوء تبذل مقاومة كبيرة جداً في وجه القوى الخارجية . وقد كانت مقاومة جسم معين للتغير في الميكانيكا الكلاسيكية شيئاً ثابتاً يتوقف على الكتلة وحدها ، أما في النظرية النسبية فهي تتوقف على كل من الكتلة والسرعة . وتبلغ القوة حداً لانهائياً من الكبر إذا اقتربت سرعة الجسم من سرعة الضوء .

ولدينا في الطبيعة قذائف تتحرك بمثل هذه السرع ، فذرات المواد الاشعاعية كالراديوم مثلاً ، تمثل دور المدفعية التي تقوم بإرسال قذائف بسرع متناهية في الكبر . سنذكر الآن باختصار أحد الآراء الحديثة في علمي الطبيعة والكيمياء : تتكون جميع المواد الموجودة في الكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية . وهذا يشبه إلى حد كبير ما نعرفه من أن جميع الباني في مدينة ما - بما فيها من أكواخ

وناطحات سحب ذات حجوم مختلفة وأشكال متباينة - مكونة من أنواع قليلة مختلفة من اللبنة . وإذن تتكون جميع عناصر عالمنا المادى - التى تتراوح بين الأيدروجين وهو أخفها وزنا واليورانيوم وهو أثقلها - من نفس النوع من اللبنة أى نفس الأنواع من الجسيمات الأولية . وأثقل هذه العناصر وزنا - أى تلك المعقدة التركيب - ليست مستقرة بل دائماً فى حالة تفكك وهو ما نعبر عنه بقولنا أن لها نشاطاً إشعاعياً . وبعض هذه اللبنة أو الجسيمات الأولية التى تبني منها هذه الذرات ذات النشاط الإشعاعى ، تنقذف أحياناً خارج الذرات بسرعة كبيرة جداً تقترب من سرعة الضوء . والرأى السائد الآن المدعم بالتجارب هو أن ذرة عنصر مشع كالراديوم مثلاً تتميز بتركيب معقد ، وأن التفكك الناتج من النشاط الإشعاعى هو أحد الظواهر التى تتضح فيها حقيقة تركيب الذرات من لبنة أكثر بساطة ، أى من الجسيمات الأولية .

ويمكننا دراسة كيفية مقاومة هذه الجسيمات المنبعثة بسرعة كبيرة لتأثير القوة الخارجية بواسطة تجارب دقيقة ومعقدة . وقد أظهرت التجارب أن المقاومة الناتجة من هذه الجسيمات تتوقف على سرعتها بالطريقة التى تنبأت بها نظرية النسبية . وفى حالات كثيرة مختلفة ، عندما أمكن تعيين مدى توقف المقاومة على السرعة وجدنا اتفاقاً تاماً بين النظرية والتجربة . وهأنحى الآن نرى مرة أخرى الظواهر الأساسية للأعمال المنتجة فى العلم أى : التنبؤ نظرياً ببعض حقائق ثم تحقيقها بالتجربة .

وتؤدى هذه النتيجة إلى تعميم ذى أهمية كبيرة . فالجسم الساكن كتلة معينة ولكن ليست له طاقة حركة ، أى طاقة ناتجة عن حركته . أما الجسم المتحرك فله كتلة وطاقة حركة ولذا فهو يقاوم التغير فى السرعة بقوة أكثر من الجسم الساكن ، ومن ذلك يظهر لنا أن طاقة حركة جسم متحرك تزيد فى مقاومته فإذا كان لدينا جسمان متساويان فى الكتلة وكان لأحدهما طاقة حركة أكبر من الآخر فإنه يقاوم فعل القوة الخارجية بقوة أكبر .

لنتخيل الآن صندوقاً ساكناً به عدد من الكرات الساكنة أيضاً بالنسبة لمجموعتنا الإحداثية . إذا أردنا تحريك الصندوق ومابه ، أو بعبارة أخرى زيادة

سرعتها ، فسنحتاج إلى قوة معينة لإحداث ذلك . ولكن هل يمكن لنفس تلك القوة أن تزيد السرعة بنفس القدر في نفس الزمن إذا كانت الكرات متحركة في جميع الاتجاهات داخل الصندوق . كما تفعل جزيئات غاز ما . بسرعة تقترب من سرعة الضوء ؟ لا بد من وجود قوة أكبر قدرأ في هذه الحالة بسبب ازدياد طاقة حركة الكرات التي تزيد بدورها في قوة مقاومة الصندوق . فطاقة الحركة تقاوم التحرك تماماً كما تفعل الكتلة . هل هذا صحيح أيضاً بالنسبة لأنواع الطاقة الأخرى ؟

تطينا الفروض الأساسية لنظرية النسبية إجابة واضحة حاسمة ذات طابع كمي وهي : تقاوم جميع الأنواع المختلفة للطاقة التغير في الحركة ؛ وتتميز الطاقة بخواص مماثلة تماماً لخواص المادة ؛ فكتلة من الحديد يزداد وزنها إذا ما أحميت لدرجة الاحمرار ، وكذلك تحمل الإشعاعات المنبعثة من الشمس ، والتي تعبر الفضاء ، طاقة كبيرة وبالتالي كتلة كذلك ، وإذن ينتج أن كتلة الشمس وجميع الكواكب تقل باستمرار . وتعتبر هذه النتيجة ذات الطابع العام نصراً كبيراً لنظرية النسبية ، وتتفق مع النتائج العملية الأخرى التي تؤيد النظرية النسبية .

وقد عرفت الطبيعة الكلاسيكية شيئين متميزين : المادة والطاقة ، فالمادة لها وزن والطاقة لا وزن لها . وقد ساءت لنا الطبيعة الكلاسيكية أيضاً قانوني بقاء ، أحدهما للمادة والآخر للطاقة . وقد سبق أن تساءلنا عما إذا كانت الطبيعة الحديثة ما تزال تعتقد في الوجود المنفصل لهذين الشيئين ولقانوني بقائهما . والجواب بالسلب ، إذ أن النظرية النسبية تنص على عدم التفرقة بين الكتلة والطاقة ، فلطاقة كتلة وللكتلة طاقة . وسيصبح لدينا بدلاً من قانوني البقاء ، قانون واحد لبقاء الكتلة (المادة) والطاقة معاً على حد سواء . وقد نجحت وجهة النظر هذه نجاحاً كبيراً وكان لها أثر كبير في تطور علم الطبيعة .

ولكن كيف ظلت حقيقة وجود كتلة للطاقة وطاقة للكتلة مخفية زمناً طويلاً ؟ وهل تزداد كتلة قطعة من الحديد فعلاً بعد إحمائها ؟ الإجابة على هذا

السؤال هي الآن بالإيجاب ، وقد كانت بالسلب (صفحة ٣٠) . ونستطيع التأكيد بأن عدد الصفحات بين هاتين الإجابتين لا تكفي لشرح هذا التناقض .

والموضوع الذي نحن بصددده الآن هو من النوع الذي رأيناه قبلاً . فتغير الكتلة الناتج من النظرية النسبية صغير لا يمكن قياسه بطريقة الوزن المباشر ولو باستخدام أدق الموازين . ويمكننا أن نثبت بطرق حاسمة ولكنها غير مباشرة على أن الطاقة لها وزن مثل المادة تماماً .

ويرجع سبب عدم ظهور هذه الحقائق واضحة للعيان في أول الأمر إلى ضآلة معدل التحويل بين المادة والطاقة . فيمكننا تشبيه نسبة الطاقة إلى الكتلة بنسبة عملة بخسة القيمة إلى عملة ذات سعر مرتفع . ويوضح لنا المثال التالي ذلك : كمية الحرارة اللازمة لتحويل ثلاثين ألف طن من الماء إلى بخار تزن حوالى جرام واحد !!! ولهذا السبب ظل الاعتقاد « بأن الطاقة لا وزن لها » زمناً طويلاً ، لضآلة قدر كتلتها .

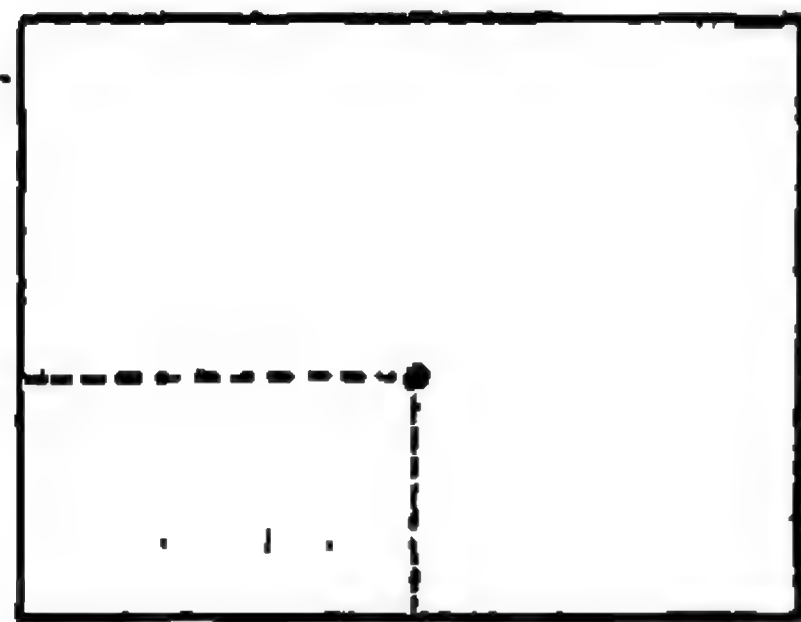
وبذلك يكون الوجود المستقل لكل من الطاقة والمادة ضخمة ثانية لنظرية النسبية ، وقد كانت الأولى هي الوسط الذي تنتشر فيه أمواج الضوء . وقد تعدى تأثير النظرية النسبية المشكلة التي كانت سبباً مباشراً لظهورها . فهي تزيل مشاكل ومتناقضات نظرية المجال ، وتضع قوانين ميكانيكية أكثر تعميماً ، وتدمج قانونين مختلفين للبقاء في قانون واحد ثم تغير بعد ذلك فكرتنا الكلاسيكية عن الزمن . وليس تأثير النظرية النسبية محصوراً في ناحية واحدة من علم الطبيعة بل إنه يشمل جميع الظواهر الطبيعية .

منصل الزمان والمكان :

« بدأت الثورة الفرنسية في باريس في اليوم الرابع عشر من يوليو سنة ١٧٨٩ »
في هذه العبارة ذكرنا مكان وزمن وقوع حدث معين . فإذا سمع هذه العبارة شخص لأول مرة وكان لا يعرف ما هي باريس ؛ فإنه يمكننا إخباره أن باريس هي

مدينة على سطح الأرض تقع على خط طول 2° شرقاً وخط عرض 49° شمالاً .
 أى أن هذين الرقمين يميزان المكان ، فى حين أن « الرابع عشر من يوليو سنة ١٧٨٩ »
 يحدد الزمن الذى وقعت فيه الحادثة . ويهمنى فى علم الطبيعة تحديد مكان وزمن
 حدث ما على وجه الدقة ، أكثر من أهميتهما فى التاريخ ، لأن هذه الأرقام المحددة
 أساس للوصف الكمي .

وقد درسنا فيما مضى — بقصد السهولة — الحركة فى خط مستقيم ، فكانت
 مجموعتنا الاحداثية قضيباً متماسكاً له نقطة أصل وليست له نهاية . فلتذكر هذا
 جيداً ولنعتبر نقطاً مختلفة على القضيب ، يمكن تعيين أماكنها بأرقام وحيدة هي
 احداثيات تلك النقط . فإذا قلنا أن احداثى نقطة ما هو $٧,٥٨٦$ قدماً فإننا نقصد
 أن بعدها عن مركز القضيب هو $٧,٥٨٦$ قدماً . وعلى العكس إذا أعطاني شخص ما
 أى عدد ، ووحدة معينة فإنه يمكنني دائماً إيجاد نقطة على القضيب تناسب هذا
 الرقم . ويمكننا أن نقول إن كل نقطة معينة على القضيب تشير إلى رقم خاص ،
 وأن أى عدد معين يشير إلى نقطة خاصة على القضيب . ويعبر الرياضيون عن هذه
 الحقيقة بالعبارة التالية : تكون جميع نقط القضيب متصلاً ذا بعد واحد . ويوجد
 بقرب كل نقطة معينة نقطاً أخرى اختيارية . ويمكننا أن نصل نقطة على القضيب
 بأخرى عليه بواسطة خطوات يمكننا تصغيرها كما نهوى . وهذه الحرية فى اختيار
 صغر الخطوات التى تصل بين نقطتين بعديتين تميز المتصل الذى ندرسه .

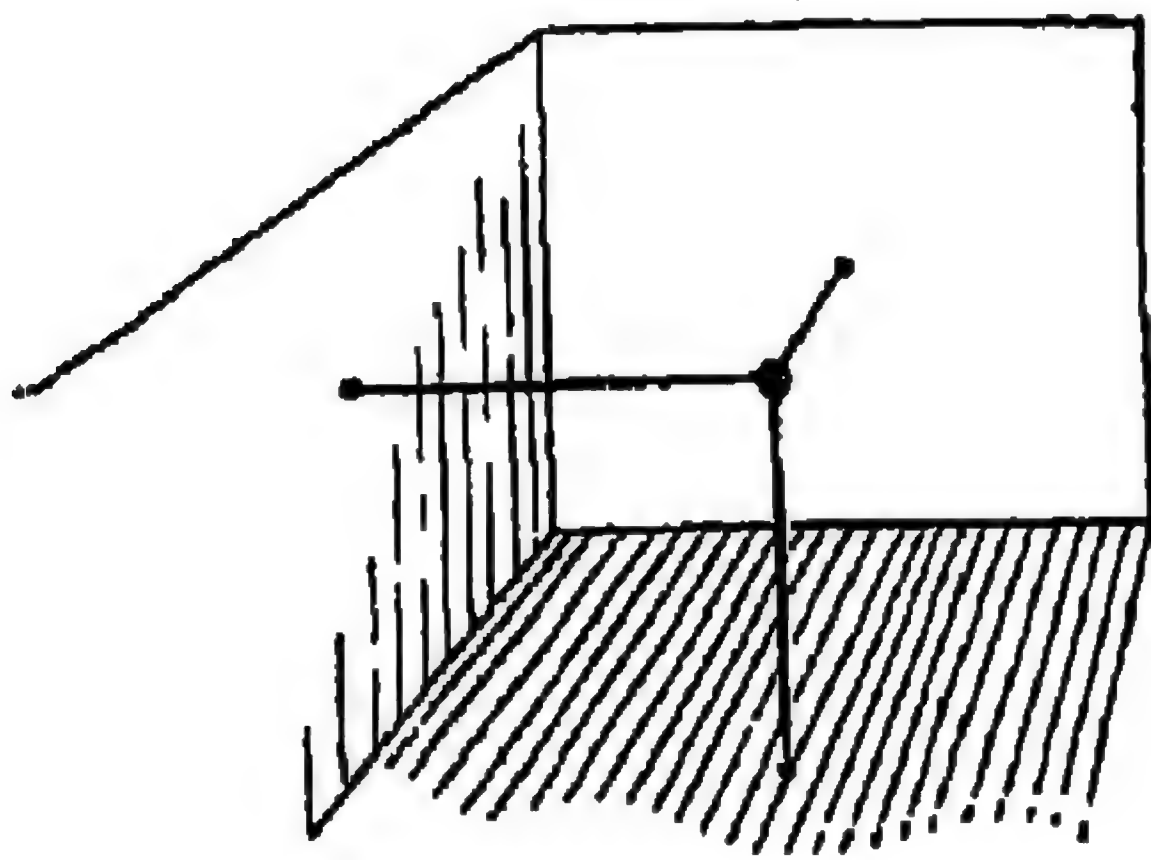


لنعتبر الآن مثلاً آخر : لنفرض أن لدينا
 مستوى معيناً أو سطح مائدة مستطيلة ، إذا فضلنا
 الأمثلة المادية . يمكننا تعيين موضع نقطة ما على
 هذه المائدة بواسطة رقمين لارقم واحد ، كما كانت
 الحال فى المثال السابق ، وهذان الرقمان هما بعدا

هذه النقطة عن حافتين متعامدتين من سطح المائدة . وإذن رقمان — لارقم واحد —
 هما اللذان يحددان مكان نقطة ما على المستوى ، وكذلك تشير كل نقطة من نقط
 المائدة إلى رقمين عددين . أو بعبارة أخرى المستوى هو متصل ذو بعدين . ويمكن

لنقطتين بعيدتين في هذا المستوى أن ترتبطا بمنحن يمكن تقسيمه إلى خطوات
نصغرها كيفما نشاء . وإذن يكون التحكم في صغر الخطوات التي تصل بين النقطتين
البعيدتين ، التي يمثل كل منهما رقمان ، من مميزات المتصل ذي البعدين .

ولنعتبر مثلاً آخر : لنفرض أننا أردنا الآن اختيار حجرة ما كجموعة
أحداثياتنا ، أى أننا نريد أن نصف الأمكنة بالنسبة لجدران الحجرة الصلبة .
فوضع نهاية المصباح الكهربائي مثلاً — إذا كان ساكناً — يمكن وصفه بثلاثة
أرقام معينة : يعين اثنان منهما البعدين عن جدارين متعامدين بينما يحدد الثالث
البعد عن الأرض أو السقف . وإذن تحدد ثلاثة أرقام معينة كل نقطة من نقط
الفراغ ، وكذلك تتميز كل نقطة من نقط الفراغ بثلاثة أرقام محددة لها . ونعبر
عن هذا بقولنا إن فضاءنا هو متصل ذو ثلاثة أبعاد . وبالمثل يكون التحكم في صغر
الخطوات التي يمكننا بواسطتها الربط بين نقطتين بعيدتين في الفراغ — كل منهما
محددة بثلاثة أرقام — من مميزات المتصل ذي الثلاثة الأبعاد .



ولكن هذا كله ليس من علم
الطبيعة في شيء . ولكي نعود إلى
دراستنا الطبيعية يجب أن نعتبر حركة
الجسيمات المادية . ولكي ندرس وتنبأ
بوقوع أحداث في الطبيعة يجب أن
نعتبر أزمنة هذه الأحداث فضلاً عن

أمكنة وقوعها . وسنسوق الآن إلى القارىء مثلاً آخر غاية في البساطة :

هب أن حجراً صغيراً (لدرجة تمكننا من اعتباره كجسيم) ألقى من قمة برج
ارتفاعه ٢٥٦ قدماً . فمنذ عصر جاليليو أصبح في إمكاننا أن نعين عند أى لحظة ما
إحداثى (أى بُعد) الحجر بعد إسقاطه من قمة البرج . وهاك جدولاً يبين أوضاع
الحجر بعد ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ثوان على التوالى :

الارتفاع عن سطح الأرض مقدراً بالأقدام	الزمن مقدراً بالتواني
٢٥٦	صفر
٢٤٠	١
١٩٢	٢
١١٢	٣
صفر	٤

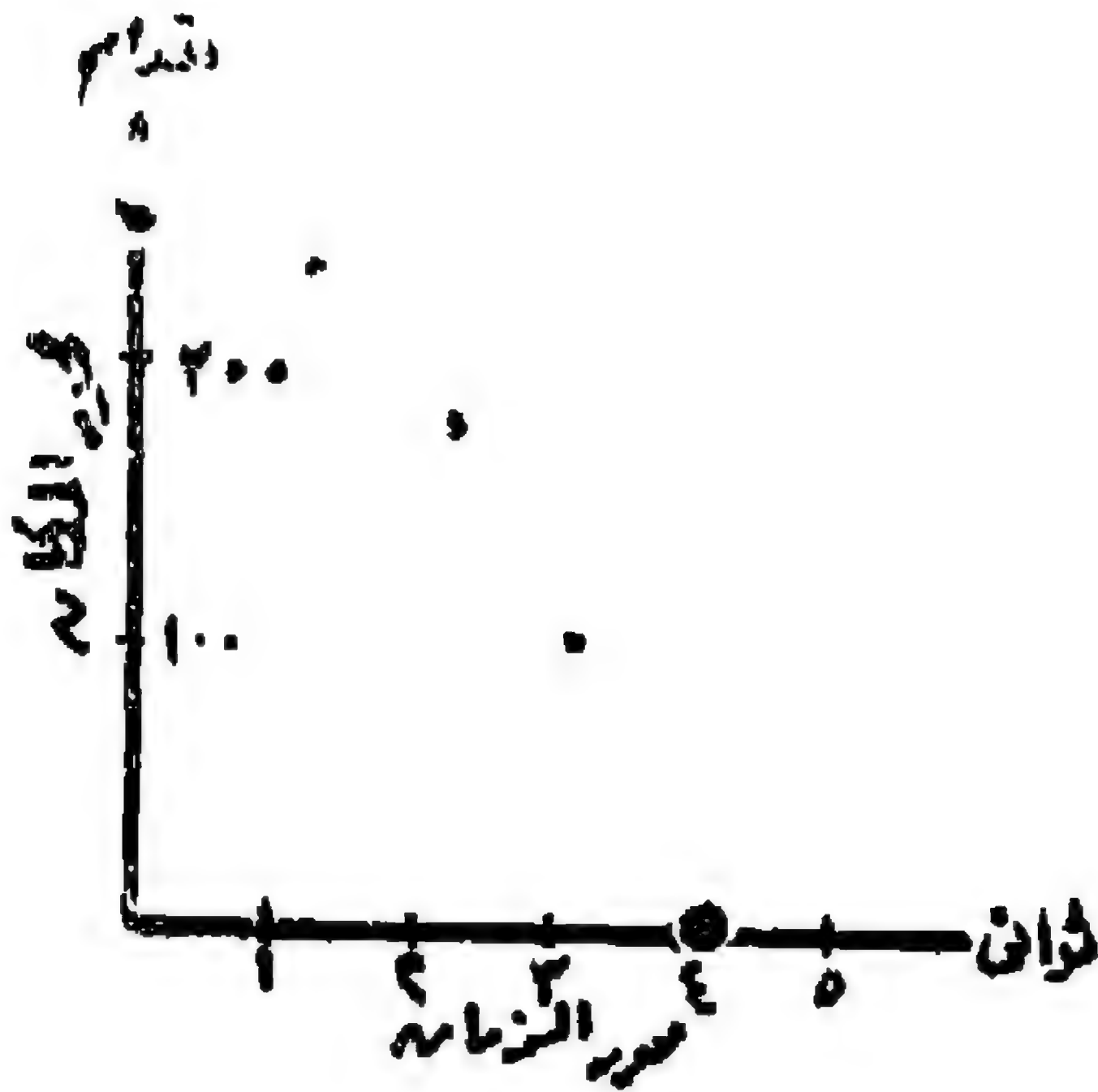
نرى في هذا الجدول خمسة أحداث ، يتحدد كل منها بواسطة رقمين ، أى الإحداثيين الزمني والمكاني ، لكل حدث . فالحدث الأول هو إسقاط الحجر من ارتفاع ٢٥٦ قدماً فوق سطح الأرض عند الزمن « صفر » ثانية . والحدث الثاني هو انطباق الحجر مع مقياسنا التماسك (البرج) عند ارتفاع ٢٤٠ قدماً فوق سطح الأرض . وقد حدث ذلك بعد الثانية الأولى . والحدث الأخير هو انطباق الحجر على سطح الأرض .

ويمكننا تمثيل المعلومات المذكورة في هذا الجدول الزمني بطريقة أخرى ؛ فتمثل الأزواج الخمسة من الأرقام ، المذكورة في الجدول ، الخمس نقط على سطح . ولنتفق أولاً على مقاييس لاتباعها في تمثيل المسافة والزمن ، ولنفرض أننا سنتبع المقياس التالي :

١ ثانية

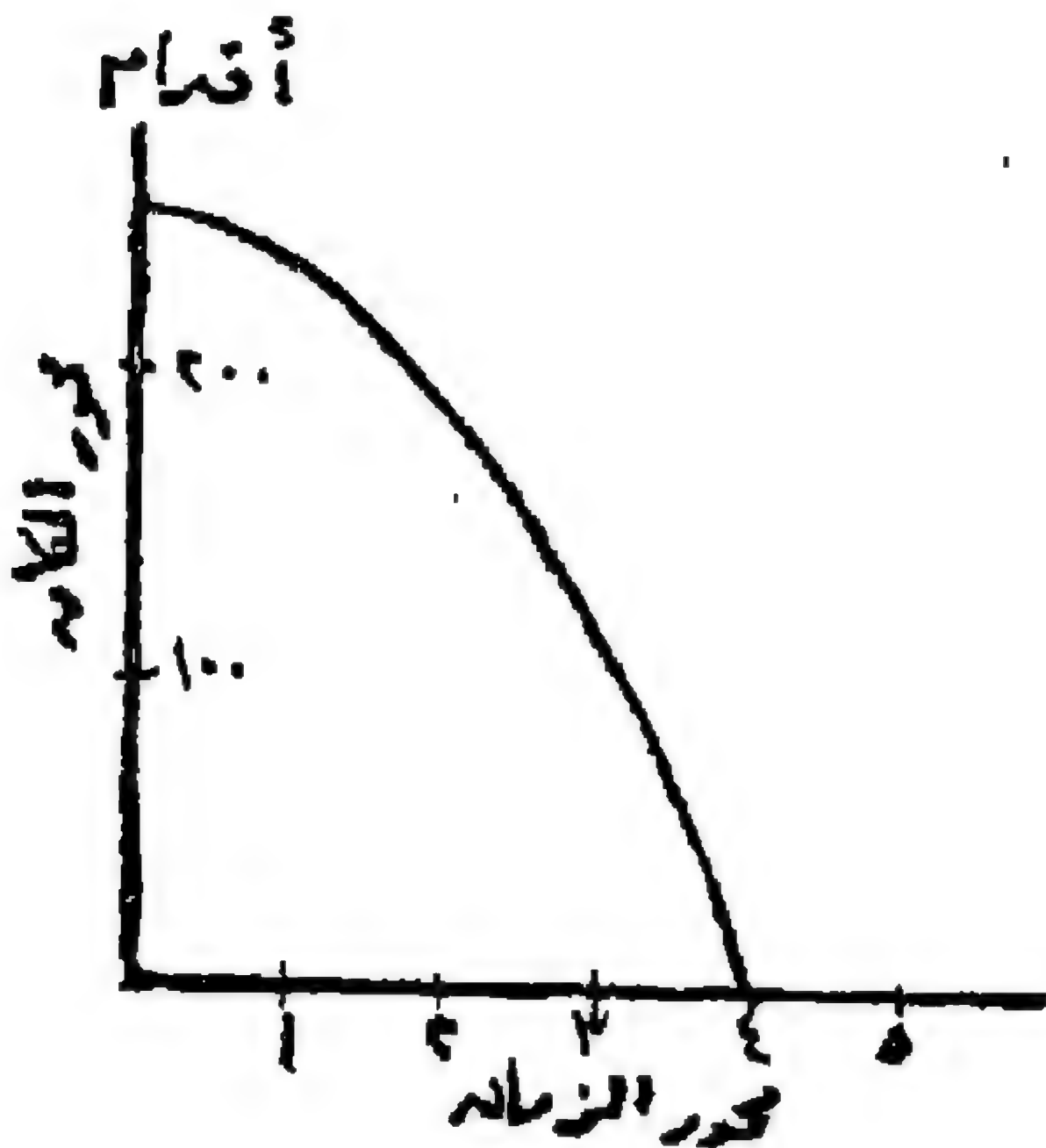
١٠٠ قدم

سنرسم بعد ذلك خطين متعامدين ، ونسمى الخط الأفقي بمحور الزمن مثلاً ، والخط الرأسى بمحور المكان . سنرى على الفور أننا يمكننا تمثيل جدولنا الزمني المكاني بخمس نقط في المستوى الذي أتبعناه لتمثيل الزمان والمكان .



وسنمثل أبعاد النقط عن محور المكان الإحداثيات الزمنية كما هي مسجلة في العمود الأول لجدولنا الزمني ، وكذلك تمثل الأبعاد عن المحور الزمني الإحداثيات المكانية . وبذلك نكون قد عبرنا عن نفس الشيء بالضبط بواسطة طريقتين مختلفتين تماماً : الجدول الزمني ؛ ونقط

المستوى ، ويمكننا استنتاج كل من هاتين الطريقتين من الأخرى . ومسألة المفاضلة بين طريقتي التمثيل هي مسألة ذوق لا أكثر ، حيث أنهما متكافئتان تماماً . لنخطو الآن خطوة أبعد من ذلك وتصور جدولاً زمنياً أدق من الجدول السابق يعطينا أوضاع الحجر الساقط ، لا لكل ثانية فقط بل لكل $\frac{1}{100}$ أو $\frac{1}{1000}$ من الثانية ، وبهذا سيكون لدينا عدد كبير جداً من النقط في مستوانا الزماني - المكاني . وإذا عرفنا الأوضاع في كل لحظة أو إذا كانت الإحداثيات المكانية معلومة بدلالة الزمن كما يقول الرياضيون فإن مجموعة النقط التي لدينا تكون خطاً متصلاً .



وبذلك يكون الرسم التالي ممثلاً للمعلومات الكاملة عن الحركة وليس لجزء فقط من هذه المعلومات . وتمثل هنا الحركة على امتداد القضيب الصلب (البرج) - أي الحركة في فضاء ذي بعد واحد - بمنحنى في متصل زمان ومكان ذي بعدين اثنين . ولكل نقطة من ثوابت متصلنا الزماني والمكاني عددان

مميزان ، يرمز أحدهما لإحداثى الزمان والاخر لإحداثى المكان وبالعكس تشير أى نقطة فى مستوى الزمان والمكان إلى عددین يحددان حدثاً ما . وتمثل نقطتان متجاورتان حدثين عند مكانين وزمانين مختلفين قليلا عن بعضهما .

ولعلك تعترض على طريقة التمثيل هذه بقولك أنه لا معنى لتمثيل وحدة الزمن بخط صغير فى الرسم البيانى ، ثم الربط بين الزمن والمكان فى شكل متصل ذى بعدين من المتصلين الأحاديا البعد . ولكن يجب عليك فى نفس الوقت أن تعترض بنفس الشدة ضد جميع المنحنيات التى تمثل تغير درجة الحرارة فى مدينة نيويورك أثناء الصيف الماضى مثلاً أو ضد جميع المنحنيات التى تمثل التغير فى مستوى المعيشة خلال السنوات القليلة الماضية ، حيث أن نفس طريقة التمثيل البيانى متبعة فى كل من هذه الأمثلة . ففى منحنيات درجة الحرارة نجمع بين متصل درجة الحرارة الأحادى البعد ومتصل الزمن الأحادى البعد ، مكونين متصلاً ثنائى الأبعاد لدرجة الحرارة والزمن .

ولنرجع الآن إلى مثال الجسم الساقط من قمة البرج البالغ من الارتفاع ٢٥٦ قدماً . فصورة الحركة البينائية هى طريقة ذات فائدة عظيمة لأنها تمكننا من تعيين مكان الجسم عند أية لحظة . ونود الآن تمثيل حركة الجسم مرة أخرى إذا عرفنا كيف يتحرك ، ويمكننا عمل ذلك بطريقتين مختلفتين .

لعلنا نذكر صورة الجسم الذى يغير مكانه بمرور الزمن فى الفضاء ذى البعد الواحد . ولم نخلط فى تلك الصورة بين الزمن والمكان بل استخدمنا صورة ديناميكية تتغير فيها الاوضاع مع الزمن .

ولكن يمكننا تصوير نفس الحركة بطريقة أخرى استاتيكية نعتبر فيها منحنيّاً فى متصل المكان والزمان ذى البعدين . وفى هذه الحالة تمثل الحركة كشيء موجود فى متصل الزمن والمكان ذى البعدين ، وليس كشيء يتغير فى المتصل المكاني ذى البعد الواحد .

وتشكافاً هاتان الصورتان تماماً مع بعضهما ، وليس تفضيل طريقة على أخرى

سوى مسألة ذوق ، وليست هناك أية علاقة بين كل ما قلناه الآن وبين نظرية النسبية . ويمكننا استخدام أى من الصورتين دون تفرقة على الرغم من أن الطبيعة الكلاسيكية قد فضلت الصورة الديناميكية التى تصف الحركة كحوادث واقعة فى المكان وكأنه ليست لها وجود فى متصل المكان والزمان . ولكن النظرية النسبية غيرت وجهة النظر هذه ، إذ كانت إلى حد كبير فى جانب الصورة الاستاتيكية ، ووجدت فى كيفية تمثيل الحركة كشيء موجود فى الزمان والمكان صورة أكثر ملاءمة وقرباً من الحقيقة . وما زال علينا أن نجيب على هذا السؤال : لماذا لا تتكافأ صورتا تمثيل الحركة من وجهة نظر النظرية النسبية على الرغم من تكافئهما من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية ؟

وسندرك الإجابة على هذا السؤال إذا اعتبرنا حركة مجموعتين إحداثيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما . فطبقاً لقواعد الطبيعة الكلاسيكية يحدد المشاهدان المقيان فى هاتين المجموعتين أحداثيات مكانية مختلفة وزمن واحد لحدث ما وإذن فى حالة مثالنا السابق يتميز انطباق الجسم على سطح الأرض فى مجموعتنا الإحداثية المختارة بالأحداثى الزمنى « ٤ » وبالإحداثى المكانى صفر وسيظل الحجر طبقاً للميكانيكا الكلاسيكية يأخذ أربع ثوان لى يصل إلى سطح الأرض فى نظر مشاهد يتحرك بانتظام بالنسبة للمجموعة الإحداثية المختارة . ولكن هذا المشاهد سيقس المسافة فى مجموعته الإحداثية وسيربط بين هذه الإحداثيات المكانية وحدث التصادم على الرغم من أن الإحداثى الزمنى سيكون واحداً فى نظره وفى نظر جميع المشاهدين الآخرين المتحركين بانتظام بالنسبة لبعضهم . فالطبيعة الكلاسيكية لا تعرف سوى زمناً واحداً مطلقاً بالنسبة لجميع المشاهدين ، وفى هذه الحالة يمكننا شطر المتصل ذى البعدين لكل مجموعة أحداثية إلى متصلين كل منهما ذو بعد واحد : الزمان والمكان . وبسبب الصفة المطلقة للزمن فإن الانتقال من الصورة الاستاتيكية إلى الصورة الديناميكية له معنى نظرى فى الطبيعة الكلاسيكية ، ولكننا سبق أن اقتنعنا بأن التحويلات الكلاسيكية يجب ألا تستخدم فى علم

الطبيعة بصفة عامة . ومن الناحية العملية تتحقق هذه التحويلات فقط في حالة السرعة الصغيرة .

وطبقاً لنظرية النسبية لن يكون زمن ارتطام الحجر مع سطح الأرض واحداً في نظر جميع الشاهدين ، إذ سيختلف الاحداثى الزمنى والاحداثى المكاني في المجموعتين الاحداثيتين ، وسيكون التغير في الاحداثى الزمنى ملحوظاً جداً إذا اقتربت السرعة النسبية من سرعة الضوء . ولا يمكننا شطر المتصل ذى البعدين إلى متصلين أحادي البعد ، كما هي الحال في الطبيعة الكلاسيكية . ويجب ألا نعتبر المكان والزمان على حدة في تعيين الاحداثيات المكانية والزمنية في مجموعة احداثية أخرى . ويظهر أن شطر المتصل ذى البعدين إلى المتصلين الاحداثى البعد عملية اختيارية ليس لها أى معنى من وجهة النظر النسبية .

ومن السهل تعميم ماسبق قوله في حالة الحركة العامة التي ليست في خط مستقيم . وفي الحقيقة أنه يلزمنا أربعة أرقام - لارقين اثنين - لوصف الأحداث في الطبيعة . وفضاء علم الطبيعة كما نتصوره خلال الأجسام وحركتها له ثلاثة أبعاد ، وتتمين حركة هذه الأجسام بواسطة ثلاثة أرقام . وتكون اللحظة التي وقع فيها الحدث الرقم الرابع . وبذلك تشير أى أربعة أرقام معينة إلى حدث ما ، كما أن أى حدث يتحدد بواسطة مثل هذه الأرقام الأربعة . وإذا كان العالم الأحداث متصلاً ذا أربعة أبعاد . وليس في هذا شيء من الغرابة . وتتحقق العبارة الأخيرة في حالتى الطبيعة الكلاسيكية ونظرية النسبية على السواء . ومرة ثانية نكتشف وجود فرق عند ما نعتبر حالة مجموعتين احداثيتين متحركتين بالنسبة لبعضهما . لنفرض أن لدينا حجرة متحركة ، وقد أخذ المشاهد المقيم داخلها وذلك المقيم خارجها في تعيين الاحداثيات المكانية الزمانية لحدث ما . سيحاول عالم الطبيعة الكلاسيكية شطر المتصل ذى الأربعة أبعاد إلى فضاء ذى ثلاثة أبعاد ومتصل زمانى ذى بعد واحد . سيهتم عالم الطبيعة القديمة فقط بالتحويلات المكانية حيث أن الزمن شيء مطلق بالنسبة له ، وسيجد أن شطر المتصل الرباعى الأبعاد إلى متصل المكان ومتصل الزمان شيئاً طبيعياً وملائماً . ولكن من وجهة نظر النسبية يتغير الزمن والمكان

عند الانتقال من مجموعة احداثية إلى أخرى ، وتحديد لنا تحويلات لورنتز خواص تحويلات متصل الزمان والمكان ذي الأربعة أبعاد لعالم الأحداث الطبيعية ذي الأبعاد الأربعة .

ويمكننا وصف عالم الأحداث ديناميكياً بصورة تتغير مع الزمن وممثلة في الفضاء ذي الثلاثة أبعاد . ولكن يمكن تمثيلها أيضاً بصورة استاتيكية في المتصل الزماني المكاني ذي الأربعة الأبعاد . ومن وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية تكافؤ الصورتان الاستاتيكية والديناميكية ، في حين أنه من وجهة النظر النسبية تعتبر الصورة الاستاتيكية أكثر ملاءمة وقرباً إلى الحقيقة .

ويمكننا استخدام الصورة الديناميكية حتى في نظرية النسبية إذا فضلنا ذلك ولكن يجب أن نتذكر أن هذا الانقسام إلى زمان ومكان ليس له أى معنى حقيقى حيث أن الزمن ليست له صفة الإطلاق . وسنستمر في استخدام اللغة الديناميكية لا الاستاتيكية في الصفحات المقبلة متذكّرين جيداً مواطن قصورها .

النسبية العامة :

ما زالت لدينا نقطة في حاجة إلى استجلاء ، إذ أننا لم نجد بعد على أحد الأسئلة الأساسية وهو : هل هناك مجموعة إحداثية قاصرة ؟ قد عرفنا بعض الشيء عن قوانين الطبيعة وعدم تغيرها بالنسبة لتحويلات لورنتز وانطباقها على جميع المجموعات القاصرة المتحركة بانتظام بالنسبية لبعضها . فلدينا القوانين ولكننا لانعرف الاحداثيات التى تنسب إليها هذه القوانين . ول斯基 نزداد إلماً بهذه المشكلة ، دعنا نناقش عالم الطبيعة الكلاسيكية ونسأله بعض أسئلة بسيطة :

« ماهى المجموعة القاصرة ؟ »

« هى مجموعة إحداثية تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ، فالجسم الذى لا تؤثر عليه قوى خارجية يتحرك بانتظام فى هذه المجموعة . وإذن يمكننا بفضل هذه الخاصية التمييز بين المجموعة الإحداثية القاصرة وبين أى مجموعة أخرى » .

« ولكن ماهو معنى القول بعدم وجود قوى تؤثر على الجسم ؟ »

« معناه ببساطة أن الجسم يتحرك بانتظام في مجموعة إحداثية قاصرة » .

وهنا يمكننا أن نضع مرة ثانية السؤال « ماهى المجموعة الإحداثية القاصرة ؟ »

ولكن بما أنه ليس هناك أمل كبير فى الحصول على إجابة تختلف عن الإجابة السابقة . فلنحاول أن نحصل على بعض معلومات بتغيير السؤال .

« هل تُعتبر المجموعة الإحداثية المثبتة فى سطح الأرض مجموعة قاصرة ؟ »

« كلا ، لأن القوانين الميكانيكا لا تنطبق تماما على سطح الأرض بسبب حركتها

الدورانية ولكن يمكننا اعتبار مجموعة إحداثية مثبتة فى الشمس مجموعة إحداثية قاصرة فى كثير من المسائل ، ولكن عندما نتكلم عن حركة الشمس الدورانية فإننا نفهم ضمناً أن مجموعة إحداثية مثبتة فيها لا يمكن اعتبارها قاصرة تماما »

« وإذن ماهى مجموعتك الإحداثية القاصرة وكيف تختار حركتها ؟ »

« المجموعة الإحداثية القاصرة هى مجرد فكرة خيالية فقط وليست لدى أية

فكرة عن إمكان تحقيقها فإذا أمكننى أن أبتعد عن جميع الأجسام المادية وأحرر نفسى من جميع التأثيرات الخارجية فإن مجموعتى الإحداثية تكون حينئذ قاصرة » .

« ولكن ماذا تعنى بمجموعة إحداثية محررة من التأثيرات الخارجية ؟ »

« أعنى أن المجموعة الإحداثية تكون قاصرة » .

أى أننا قد رجعنا مرة أخرى إلى حيث بدأنا ! !

وهكذا كشف لنا هذا الحوار عن صعوبة خطيرة فى علم الطبيعة الكلاسيكى .

فلدينا قوانين ولكننا لا ندرى إلى أى مجموعة إحداثية ننسبها إليها ! وهكذا يبدو لنا أن عالمنا الطبعمى كله مبنى على أساس من الرمال .

ويمكننا مواجهة هذه المعضلة من جانب آخر . لتتصور أن الكون بأجمعه

لا يحتوى سوى جسماً مادياً واحداً سنتخذهُ ممثلاً لمجموعتنا الإحداثية . ولنفرض أن هذا الجسم بدأ يدور حول نفسه . فطبقاً للميكانيكا الكلاسيكية ستكون القوانين

الطبيعية للجسم الدائر مختلفة عن تلك المناظرة لها في الجسم الساكن . فإذا كانت قاعدة القصور الذاتي صحيحة في حالة من هاتين الحالتين فإنها لن تصح في الأخرى ، ولكن هذا القول غير سليم ، إذ هل يصح لنا أن نعتبر حركة جسم واحد فقط في السكون بأجمعه ؟ مع أننا نعني دائماً بحركة الجسم « هذا التغير في موضعه بالنسبة لجسم آخر . وإذن يكون من غير الطبيعي أن نتكلم عن حركة جسم واحد فقط ، وهكذا تتعارض الميكانيكا الكلاسيكية مع الطبيعة حول هذه النقطة . وللخروج من هذا المأزق فرض نيوتن أنه إذا كانت قاعدة القصور الذاتي صحيحة فإن المجموعة الاحداثية تكون إما ساكنة أو متحركة بحركة منتظمة . وإذا كانت قاعدة القصور غير صحيحة فإن الجسم يتحرك حركة غير منتظمة ، وإذن يتوقف قولنا بالحركة أو السكون على ما إذا كانت جميع القوانين الطبيعية تنطبق أو لا تنطبق على مجموعة إحداثية معينة .

لنعتبر جسمين كالشمس والأرض مثلاً . فالحركة التي نلاحظها هي حركة نسبية ، يمكن وصفها بتثبيت المجموعة الاحداثية بالأرض أو الشمس . ومن جهة النظر هذه يظهر لنا أن اكتشافات كوبرنيكوس العظيمة ليست سوى نقل المجموعة الاحداثية من الأرض إلى الشمس . ولكن بما أن الحركة نسبية ويمكننا استخدام أي مجموعة إحداثية فلن يكون لدينا أي سبب لتفضيل مجموعة إحداثية على أخرى . وهنا يتدخل علم الطبيعة مرة أخرى ليغير وجهة نظرنا . فالمجموعة الإحداثية المتصلة بالشمس تشبه مجموعة قاصرة أكثر من تلك المتصلة بالأرض ، ويجب أن تنطبق قوانين علم الطبيعة على مجموعة كوبرنيكوس الإحداثية أكثر من انطباقها على مجموعة بطليموس . ويمكن تقدير أهمية اكتشاف كوبرنيكوس فقط من وجهة نظر علم الطبيعة ، فهي ترينا الأهمية الفائقة لاستخدام مجموعة إحداثية مثبتة تماماً في الشمس لوصف حركة النجوم .

ولا توجد حركة منتظمة مطلقة في علم الطبيعة الكلاسيكي . فإذا تحركت مجموعتان إحداثيتان بانتظام بالنسبة لبعضهما فليس هناك معنى للقول بأن « هذه المجموعة الإحداثية ساكنة والأخرى متحركة » . ولكن إذا كانت المجموعتان

الاحداثيتان متحركتين بدون انتظام بالنسبة لبعضهما فهناك ما يدفعنا للقول « هذا الجسم يتحرك والآخر ساكن (أو يتحرك بانتظام) ». فالحركة المطلقة لها هنا معنى محدد تماما . وتوجد هنا هوة سحيقة تفصل بين المنطق من جانب والطبيعة الكلاسيكية من جانب آخر . وترتبط الصعوبات المذكورة والمتعلقة بالمجموعة القاصرة وبالحركة المطلقة ببعضها ، ويمكن أن تحدث الحركة المطلقة فقط على أساس المجموعة القاصرة التي تتحقق فيها قوانين الطبيعة .

ولعله يبدو أنه ليس هناك مخرج من هذه الصعوبات وأنه ليست هناك نظرية يمكن أن تكون بمنجى عنها . ويرجع ذلك إلى حقيقة كون قوانين الطبيعة تتحقق فقط في مجموعة خاصة من المجموعات الإحداثية أى المجموعة القاصرة . ويتوقف حل هذه المصاعب على الإجابة على السؤال التالى : هل يمكننا صياغة قوانين الطبيعة بحيث تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية : ليس فقط في تلك التي تتحرك بانتظام ، بل أيضاً في تلك التي تتحرك أية حركة اختيارية بالنسبة لبعضها البعض ؟ إذا كان هذا فى استطاعتنا فإننا سنتغلب على مصاعبنا وسنكون حينئذ قادرين على تطبيق قوانين الطبيعة فى أية مجموعة إحداثية . ولن يكون هناك حينئذ أى معنى للتناحر بين آراء بطليموس وكوبرنيكوس الذى ازداد حدة فى الأيام الأولى من تاريخ العلم . إذ يمكن استخدام أى مجموعة إحداثية دون تفضيل ، وسيكون للجملتين « الشمس ساكنة والأرض متحركة » و « الشمس متحركة والأرض ساكنة » معنيان مختلفان خاصان بمجموعتين إحداثيتين مختلفتين .

هل نستطيع حقاً أن نبني علم طبيعة نسبي ، يتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية ؟ علم طبيعة ليس به مكان لما يسمى بالمطلق ولكن فقط للحركة النسبية ؟ حقاً إن هذا ممكن !!

ولدينا على الأقل دليل — رغماً من عدم قوته — يرشدنا إلى طريقة بناء علم الطبيعة الحديث . يجب أن ينطبق علم الطبيعة الحديث على جميع المجموعات الإحداثية وإذن ينطبق كذلك على الحالة الخاصة للمجموعة الإحداثية القاصرة . ونحن نعلم الآن قوانين المجموعة الإحداثية القاصرة . ويجب أن تتحول القوانين العامة الجديدة

المتحققة في جميع المجموعات الإحداثية - في الحالة الخاصة للمجموعة القاصرة إلى القوانين القديمة المعروفة .

وقد حلت معضلة صياغة قوانين علم الطبيعة لكل مجموعة إحداثية ، بما يسمى بنظرية النسبية العامة ، والنظرية السابقة التي تنطبق فقط على المجموعات القاصرة تسمى بنظرية النسبية الخاصة . ولا يمكن للنظريتين طبعاً أن يتعارضا مع بعضهما ، حيث أننا يجب دائماً أن نجعل القوانين العامة للمجموعة القاصرة تشمل القوانين القديمة لنظرية النسبية الخاصة . وكما كانت المجموعة الاحداثية القاصرة فيما مضى المجموعة الوحيدة التي صيغت فيها قوانين علم الطبيعة ، فإنها الآن ستكون هي الحالة النهائية الخاصة ، حيث أنه قد أصبح من الممكن لجميع المجموعات الاحداثية أن تتحرك أية حركة إختيارية بالنسبة لبعضهما البعض .

وهذا هو برنامج نظرية النسبية العامة . ولكننا يجب أن نكون أكثر غموضاً عن ذي قبل أثناء وصفنا للطريق الذي أدى إلى هذه النظرية . فالصعوبات الجديدة الناشئة من التطور العلمى تدفع نظريتنا لكي تكون أكثر إيهاماً . وما زالت أمامنا مفاجآت غير منتظرة . ولكننا نهدف دائماً إلى التوصل إلى فهم أعمق للحقائق ، وقد أضيفت حلقات إلى سلسلة المنطق التي تربط بين النظرية والتجربة . ولكي نزيل من الطريق المؤدى من النظرية إلى التجربة (المشاهدة) الافتراضات المفتعلة غير الضرورية ، يجب علينا أن تزيد في طول السلسلة كثيراً ، وكلما كانت فروضنا أساسية وأكثر سهولة كلما ازدادت وسائلنا الرياضية تعقداً ، وأصبح الطريق من النظرية إلى التجربة أطول وأكثر غموضاً وتعقيداً . ويمكننا القول - رغماً عما يبدو في ذلك من تناقض - بأن علم الطبيعة الحديث أسهل من علم الطبيعة القديم وإذن فهو يبدو أكثر صعوبة وتعقيداً . وكلما كانت صورتنا للعالم الخارجى أكثر سهولة وازدادت الحقائق التي تتضمنها ، كلما ازدادت معها قوة إيماننا بتناسق الكون ونظامه الدقيق .

وفكرتنا الجديدة بسيطة ! أن نبني علم طبيعة يتحقق في جميع المجموعات الإحداثية . ويؤدى تحقيق ذلك إلى صعوبات جمة ويدفعنا إلى استخدام وسائل

رياضية تختلف عن تلك التي استخدمناها حتى الآن في علم الطبيعة . وسنشرح هنا فقط العلاقة بين تحقيق هذا البرنامج وبين مشكلتين أساسيتين وهما الجاذبية والهندسة .

خارج وداخل المصعد .

يعتبر قانون القصور الذاتي أول تقدم كبير في علم الطبيعة ، بل حري بنا أن نعتبره البداية الحقيقية لهذا العلم . وقد نشأ هذا القانون من التأمل في تجربة مثالية أى في حالة جسم يتحرك باستمرار دون أية مقاومة ودون أى تأثير لقوى خارجية . ومن هذا المثال وأمثلة أخرى كثيرة بعد ذلك أدركنا أهمية التجربة المثالية في دراستنا . وسندرس هنا أيضاً تجارب أخرى مثالية ، وعلى الرغم من أن هذه التجارب ستبدو خيالية فإنها مع ذلك ستساعدنا على فهم كل ما نستطيع فهمه من نظرية النسبية باستخدام وسائلنا البسيطة .

وقد كان لدينا فيما سبق التجارب المثالية التي قمنا بها مستخدمين الحجرة المتحركة ، وسنستخدم الآن على سبيل التغير مصعداً هابطاً إلى سطح الأرض . لتصور مصعداً ساكناً عند قمة ناطحة سحاب ، أعلا بكثير من جميع الناطحات الحقيقية ، ولنفرض أن الأسلاك الحاملة للمصعد انقطعت فجأة وأن المصعد قد أخذ في الهبوط نحو سطح الأرض . لنفرض أن المشاهدين داخل المصعد أخذوا في القيام ببعض تجارب أثناء الهبوط ، ولن ندخل في اعتبارنا وجود مقاومة الهواء أو الاحتكاك في هذه التجربة المثالية . لنفرض أن أحد المشاهدين قد أخرج من أحد جيوبه منديلاً وساعة ، ثم تركها يسقطان ، فماذا يحدث لهذين الجسمين ؟ . من وجهة نظر المشاهد الخارجي الذي يشاهد ما يحدث خلال نافذة المصعد سيرى أن المندبل والساعة سوف يسقطان نحو الأرض بنفس الطريقة وبنفس العجلة . ونحن نذكر أن عجلة جسم ساقط لا تتوقف أبداً على كتلته ؟ وأن هذه الحقيقة هي التي أظهرت تساوى الكتلة الجاذبية والكتلة القاصرة . (صفحة ٢٦) . ونحن نذكر أيضاً أن تساوى هاتين الكتلتين كان مجرد صدفة فقط من وجهة نظر الميكانيكا

الكلاسيكية ولم يكن له أى أثر فى تكوين هذه الميكانيكا . ومع ذلك فإننا نرى هنا أيضاً أن هذا التساوى - الذى ظهر أثره فى تساوى العجلة لجميع الأجسام الساقطة ذو أهمية كبيرة وأساسى جداً لدراستنا كلها .

لنعود مرة أخرى إلى موضوع المندبل والساعة الساقطين ؛ فمن وجهة نظر المشاهد الخارجى يسقط كلا الجسمين بنفس العجلة . ولكن المصعد بجدرانه وأسقفه سيسقط بنفس العجلة ، وإذن سيظل بعدا الجسمين المذكورين عن قاع المصعد ثابتين لا يتغيرا . أما من وجهة نظر المشاهد الداخلى فإن الجسمين سيظلان دائماً فى مكانيهما ، تماماً كما تركهما المشاهد . وسيتجاهل المشاهد الداخلى مجال الجاذبية حيث أن مصدره يقع خارج مجموعته الإحداثية . وسيجد أنه ليست هناك أية قوى داخل المصعد تؤثر على الجسمين ولذا فهما فى حالة سكون ، تماماً كما لو كانا فى مجموعة إحداثية قاصرة . وسرى أن أموراً غريبة تحدث داخل المصعد ! فإذا دفع المشاهد جسماً فى أى اتجاه ، إلى أسفل أو إلى أعلا مثلاً ، فإن هذا الجسم سيظل دائماً يتحرك حركة منتظمة ، ما دام لا يرتطم بسقف المصعد أو قاعدته . وباختصار فإن قوانين الميكانيكا الكلاسيكية تتحقق داخل المصعد فى نظر المشاهد الداخلى . وستتحرك جميع الأجسام طبقاً لقانون القصور الذاتى . وستختلف مجموعتنا الإحداثية الجديدة المثبتة فى المصعد الساقط عن المجموعة الإحداثية القاصرة فى نقطة واحدة . يتحرك الجسم الذى لا تؤثر عليه أى قوة بانتظام إلى الأبد فى المجموعة الإحداثية القاصرة . ولا تنقيد المجموعة الإحداثية القاصرة - كما فرضت فى علم الطبيعة الكلاسيكى - بمكان أو زمان . وحالة المشاهد فى مصعدنا مختلفة إذ أن خاصية القصور الذاتى فى مجموعته الإحداثية مقصورة على المكان والزمان . وسيأتى الوقت الذى يصطدم فيه الجسم المتحرك مع جدران المصعد فتتغير حركته المنتظمة . وسيأتى أيضاً الوقت الذى يصطدم فيه المصعد مع سطح الأرض فيقضى على المشاهدين وعلى تجاربهم أجمعين . فليست المجموعة الإحداثية سوى صورة مصغرة لمجموعة إحداثية قاصرة حقيقية .

والطابع المحلى للمجموعة الإحداثية جد أساسى . وإذا كان طول قاعدة

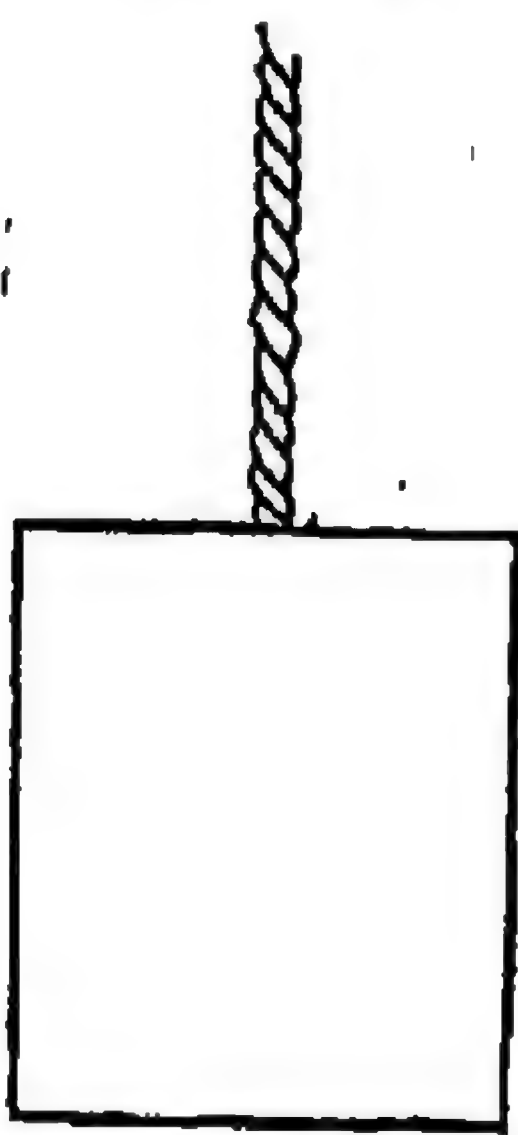
مصعدنا الهابط يمتد من القطب الشمالى إلى خط الاستواء ، ووضعنا المندبل فوق القطب الشمالى والساعة فوق خط الاستواء فإن المشاهد الخارجى سيحكم بأن هذين الجسمين لن تكون لهما نفس العجلة وإذن لن يكونا ساكنين بالنسبة لبعضهما . وبهذا تفشل استنتاجاتنا !! وإذن يجب أن يكون المصعد ذو أبعاد محدودة بحيث تكون عجلة جميع الأجسام ثابتة بالنسبة للمشاهد الخارجى . وعلى هذا الأساس ، يكون للمجموعة الإحداثية صفة القصور الذاتى بالنسبة للمشاهد الداخلى . ويمكننا دائماً إيجاد مجموعة إحداثية تتحقق فيها جميع القوانين الطبيعية على الرغم من كونها محدودة فى المكان والزمان . فإذا تخيلنا مجموعة إحداثية أخرى ، كمصعد آخر يتحرك بانتظام بالنسبة للمصعد الآخر الساقط تحت تأثير الجاذبية وحدها فإن كلا من هاتين المجموعتين الإحداثيتين ستكون قاصرة محلياً . وستكون القوانين نفسها متتحقة فى كلا المجموعتين ، ويمكننا الانتقال من مجموعة إلى أخرى باستخدام تحويلات لورنتز . ولنستمع الآن إلى وصف كل من المشاهدين الخارجى والداخلى لما يحدث داخل المصعد .

سيلاحظ المشاهد الخارجى حركة المصعد وجميع الأجسام الكائنة داخله وسيجدها متفقة مع قانون نيوتن للجاذبية . وبالنسبة له لن تكون الحركة منتظمة بل ذات عجلة بسبب فعل مجال الجاذبية الأرضية . ولكن إذا افترضنا وجود جيل من علماء الطبيعة ، ولدوا ونشأوا فى المصعد فإن آراؤهم بصدد ما يحدث فى المصعد ستكون جد مختلفة ، إذ سيعتقدون فى وجود مجموعة قاصرة وسينسبون جميع قوانين الطبيعة إلى مصعدهم ، لأنهم يعتقدون — بحق — أن القوانين تأخذ صورة بسيطة فى مجموعتهم الإحداثية . وسيكون من الطبيعى فى رأيهم الفرض بأن مصعدهم ساكن لا يتحرك وأن مجموعتهم الإحداثية قاصرة .

ومن المستحيل فض الخلاف فى رأى بين المشاهدين الخارجى والداخلى ، فكل منهما يعتقد أن الصواب هو فى نسبة جميع الإحداثيات إلى مجموعته الإحداثية ويمكن وضع كل من الرأين فى وصف الظواهر الطبيعية فى صيغة مقبولة . ونرى من هذا المثال أنه يمكن وضع نظريتين مقبولتين لوصف الظواهر

الطبيعية في مجموعتين إحدائيتين ، حتى ولو لم يكونا متحركين بانتظام بالنسبة لبعضهما . وفي مثل هذه النظريات يجب أن نعتبر « الجاذبية » فتكون بذلك « قنطرة » تمكنا من الانتقال من مجموعة إحدائية إلى أخرى . سيشعر المشاهد الخارجى بوجود مجال الجاذبية في حين أن المشاهد الداخلى لن يعترف بوجوده . سيرى المشاهد الخارجى أن المصعد يتحرك بمجلة في مجال الجاذبية الأرضية ، في حين أن المشاهد الداخلى سوف يحزم بعدم وجود أى مجال للجاذبية في مجموعته ، ولكن « القنطرة » — أى مجال الجاذبية — التى سببت إمكان صياغة القوانين في صورة مقبولة في كلا المجموعتين ، تتصل اتصالاً وثيقاً بالتكافؤ بين كتلة الجاذبية والكتلة القاصرة . وبدون هذا الدليل — الذى لم تنبه إليه الميكانيكا الكلاسيكية — لن يكون هناك أى أساس لدراستنا الحالية .

لنعتبر الآن تجربة أخرى مثالية . لنفرض أن هناك مجموعة إحدائية قاصرة يتحقق فيها قانون القصور الذاتى . وقد سبق أن وصفنا ما يحدث في مصعد ساكن في مثل هذه المجموعة الإحدائية القاصرة . ولكننا سنغير تلك الصورة الآن .



لنفرض أن حبلًا قد ثبت في المصعد وأن قوة ما ثابته أخذت في شد المصعد إلى أعلا في الاتجاه المبين في الرسم . ولن يهمنا كيفية عمل ذلك . وحيث أن قوانين الميكانيكا تتحقق في هذه المجموعة الإحدائية فإن المصعد كله سيتحرك بمجلة ثابتة في اتجاه الحركة . لنستمع الآن مرة أخرى إلى ما يقوله كل من المشاهدين الخارجى والداخلى في وصف الظواهر التى تحدث في المصعد .

المشاهد الخارجى : : مجموعتى الإحدائية قاصرة . إنى أشاهد المصعد يتحرك بمجلة ثانية ، لأن هناك قوة ثابتة تؤثر عليه ، وسيكون المشاهدون داخل المصعد في حركة مطلقة ولذا لن تتحقق قوانين الميكانيكا بالنسبة لهم . ولن يجدوا مثلاً أن الأجسام التى لا تؤثر عليها أنه قوى تظل ساكنة . وإذا ترك جسم في هواء المصعد فإنه سرعان ما يصطدم بقاعدة المصعد ، لأن تلك القاعدة تتحرك إلى أعلا

مقتربة من الجسم الساقط . ويحدث مثل هذا تماماً للساعة وللمنديل . ويبدو من غير المألوف في نظري أن يظل المشاهد الداخلي ملازماً لقاعدة المصعد ، لأنه إذا قفز إلى أعلا فسرعان ما تلحق قاعدة المصعد .

المشاهد الداخلي : إننى لا أرى ما يجعلنى أعتقد أن المصعد فى حركة مطلقة . وأعتقد أن مجموعتي الإحداثية المثبتة فى المصعد ليست حقيقة مجموعة قاصرة ولكننى لا أرى أن هذا له علاقة بالحركة المطلقة . فساعتى ومندىلى وجميع الأجسام تسقط نحو القاعدة لأن المصعد كله وقع تحت تأثير مجال الجاذبية . وأشاهد نفس أنواع الحركة كما يشاهدها القيم على سطح الأرض بالضبط . وهو يشرحها بمنتهى البساطة على أساس الفرض بوجود مجال الجاذبية . وينطبق هذا الوصف تماماً على الحالة التى أنا بها .

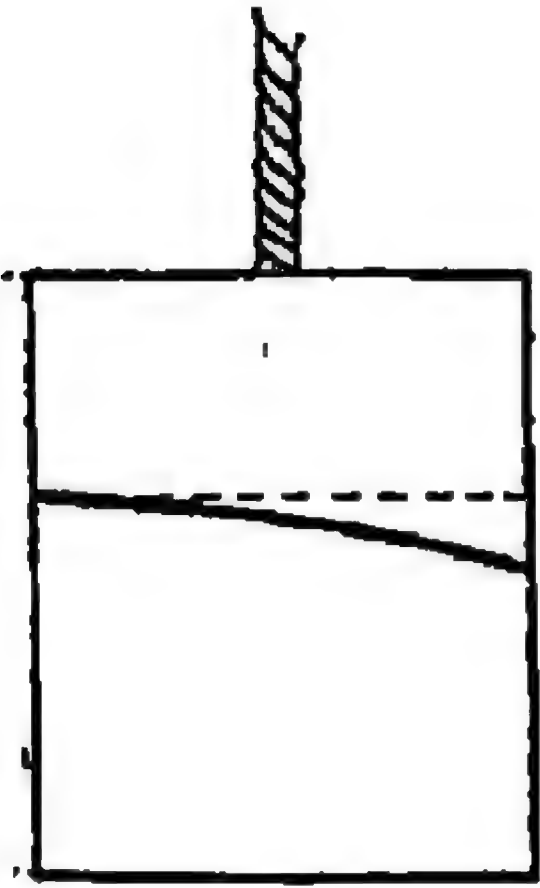
وهذا الوصف للظواهر الطبيعية من وجهتى نظر المشاهدين الخارجى والداخلى مقبول فى حد ذاته ولا يمكننا أن نقرر أيهما هو الصواب . ويمكننا اتباع أيهما لوصف الظواهر التى تحدث فى المصعد ؛ إما الحركة غير المنتظمة وعدم وجود مجال الجاذبية فى رأى المشاهد الخارجى ، أو السكون ووجود مجال الجاذبية بالنسبة للمشاهد الداخلى .

ويمكن للمشاهد الخارجى أن يفرض أن المصعد فى حركة مطلقة غير منتظمة ولكن الحركة تحت تأثير مجال الجاذبية لا يمكن تسميتها حركة مطلقة .

ولعل هناك طريقاً للخلاص من التردد بين هاتين الطريقتين فى وصف أحداث الطبيعة ، ولعلنا نستطيع التوصل إلى رأى خاص باتباع إحدى هاتين الطريقتين . لنفرض أن شعاعاً من الضوء مر خلال المصعد فى اتجاه أفقى خلال نافذة جانبية ووصل إلى الجانب الآخر فى برهة قصيرة . لنستمع مرة أخرى إلى رأى المشاهدين السابقين فى مسار الضوء .

سيصف المشاهد الخارجى — الذى يعتقد فى أن المصعد يتحرك بمجلة — هذه الظاهرة لنا بقوله : يدخل الشعاع الضوئى من نافذة المصعد ويتحرك أفقياً

في خط مستقيم بسرعة ثابتة في اتجاه جدار المصعد المقابل للنافذة . ولكن المصعد يتحرك إلى أعلا ، ولذا فإن الضوء عند وصوله إلى الجدار المقابل ، يكون المصعد قد ارتفع عن مكانه قليلا ، وإذن سيقع الشعاع الضوئي على الجدار في نقطة أسفل من تلك التي تقابل نقطة دخول الشعاع الضوئي . وسيكون الفرق طفيفاً جداً ولكن وجوده حقيقة لا شك فيها ، وسيبرى من بالمصعد أن الضوء لا يتحرك في خطوط مستقيمة بل في خطوط منحنية . وينجم هذا الفرق عن المسافة التي ارتفعها المصعد في نفس الزمن الذي يمر فيه الضوء خلاله .



سيقول المشاهد الداخلي — الذي يعتقد بوجود مجال الجاذبية الذي يؤثر على جميع الأجسام الموجودة بالمصعد — ليست هناك أية حركة ذات عجلة بالمصعد ولكنني أشعر فقط بوجود مجال جاذبية . والشعاع الضوئي لا وزن له وإذن لن يتأثر بفعل الجاذبية . فإذا أرسل شعاع في اتجاه أفقي فإنه سيقابل الحائط في نقطة تقابل تماماً تلك التي أرسل منها .

ويبدو من هذا أن هناك احتمالاً للحكم في جانب إحدى هاتين النظريتين المختلفتين ، لأن الظاهرة الأخيرة ستكون مختلفة في نظر كل من المشاهدين . وإذا كان هناك شيء غير منطقي في إحدى هاتين النظريتين فإن أسس دراستنا كلها تنهار ؛ ولا يمكننا أن نصف كل الظواهر بطريقتين مقبولتين على أساس فرض وجود مجال للجاذبية أو عدم وجوده .

ومن حسن الحظ أن هناك خطأ كبيراً في تحليل المشاهد الداخلي ، إذ يقول إن شعاع الضوء لا وزن له وبذلك لن يتأثر بفعل الجاذبية ، لأن ذلك لا يمكن أن يكون صحيحاً ! فالشعاع الضوئي يحمل طاقة ولطاقة كتلة . وتتأثر كل كتلة قاصرة بمجال الجاذبية لأن الكتلة القاصرة وكتلة الجاذبية متكافئتان . وإذن ينبغي الشعاع الضوئي في مجال الجاذبية تماماً كما يحدث لجسم قذف بسرعة الضوء في اتجاه أفقي .

ولو أبدى المشاهد الداخلى أسباباً صحيحة واعتبر انحناء الأشعة الضوئية في مجال الجاذبية لا تفقت نتائجها مع ما يراه المشاهد الخارجى .

وطبيعى أن مجال الجاذبية الأرضية ضعيف جداً لدرجة أننا لا نستطيع قياس انحناء الأشعة الضوئية عملياً . ولكن التجارب الشهيرة التى أجريت أثناء خسوف الشمس قد أظهرت بشكل قاطع — وإن يكن غير مباشر — تأثير مجال الجاذبية على مسار شعاع ضوئى .

وينتج من هذه الأمثلة أن هناك أملاً قوياً فى بناء علم الطبيعة على أساس النظرية النسبية . ولكن يجب أولاً أن ندرس موضوع الجاذبية .

وقد رأينا من مثال المصعد الصورتين المقبولتين لوصف أحداث الطبيعة . فقد نفرض وجود حركة غير منتظمة وقد لا نفرضها . ويمكننا حذف الحركة « المطلقة » من أمثلتنا بفرض وجود مجال للجاذبية . أى أن الحركة غير المنتظمة ليس فيها شئ من صفة الإطلاق ، إذ أن مجال الجاذبية يقضى عليها قضاء مبرماً .

ويمكننا طرد أشباح الحركة المطلقة والمجموعة الإحداثية القاصرة من علم الطبيعة وبناء علم طبيعة نسبي . وترينا تجاربنا المثالية كيف يرتبط موضوع نظرية النسبية العامة ارتباطاً وثيقاً مع موضوع الجاذبية ولماذا يعتبر تكافؤ الكتلة القاصرة مع كتلة الجاذبية ذا أهمية بالغة فى هذا الارتباط . ومن الواضح أن حل موضوع الجاذبية فى النظرية العامة للنسبية يجب أن يختلف عن الحل المبني على أساس نظرية نيوتن . يجب أن تصاغ قوانين الجاذبية — ككل القوانين الطبيعية — لجميع المجموعات الإحداثية الممكنة ، فى حين أن قوانين الميكانيكا الكلاسيكية كما صاغها نيوتن تتحقق فقط فى المجموعات الإحداثية القاصرة .

الهندسة والتجربة :

لعل مثالنا التالى يكون أكثر إمعاناً فى الخيال من مثال المصعد الساقط . وعلينا الآن أن ندرس موضوعاً جديداً وهو الصلة الموجودة بين نظرية النسبية العامة وبين الهندسة ولنبدأ بوصف عالم تعيش فيه مخلوقات ذات بعدين فقط .

ولنست ذات أبعاد ثلاثة مثلنا ، وقد عودتنا السيما على المخلوقات ذات البعدين التي تمثل وتعيش على الشاشة ذات البعدين أيضاً . لتتصور أن هذه الأشكال الخيالية — أى المثلين على الشاشة — لها وجود حقيقى وتتميز بالقدرة على التفكير والقيام بدراسات علمية وأن الشاشة ذات البعدين تمثل الفضاء الهندسى لهذه المخلوقات وستكون هذه المخلوقات عاجزة عن تخيل وجود فضاء ذى ثلاثة أبعاد ، تماماً كما أننا نعجز عن تخيل عالم ذى أربعة أبعاد . وستعرف هذه المخلوقات الخطوط المستقيمة والمنحنية والدوائر ولكنها ستعجز عن بناء كرة لأن هذا يتطلب منها الابتعاد عن الشاشة ذات البعدين . ونحن فى موقف مماثل إذ نستطيع ثنى الخطوط المستقيمة والسطوح ولكن يشق علينا تصور انحناء فضاء ذى ثلاثة أبعاد .

وتستطيع الأشباح الثنائية الأبعاد الإلمام بأصول هندسة اقليدس ذات البعدين بواسطة المعيشة والتفكير والتجارب . فيمكنها مثلاً اثبات أن مجموع زوايا المثلث تساوى ١٨٠ درجة ويمكنها كذلك رسم دائرتين متحدتين فى المركز ، إحداها صغيرة والأخرى كبيرة . وستجد أن نسبة محيطى هاتين الدائرتين إلى بعضهما تساوى نسبة نصف القطرين ، وهى نتيجة مميزة لهندسة اقليدس . فإذا كانت الشاشة لانهائية فى الكبر فإن هذه المخلوقات ستجد أنها إذا حاولت القيام برحلة فى خط مستقيم فإنها لن ترجع أبداً إلى النقطة التى بدأت منها رحلتها .

لتتصور أن هذه المخلوقات الثنائية الأبعاد تعيش فى ظروف مختلفة . لتتصور مثلاً أن شخصاً من العالم ذى الثلاثة أبعاد قد حمل هذه المخلوقات ونقلها من الشاشة إلى سطح كرة ذات نصف قطر كبير جداً . فإذا كانت هذه الأشباح صغيرة جداً بالنسبة للسطح كله وإذا لم تكن لديهم وسائل للمواصلات البعيدة ولا يمكنهم التحرك طويلاً فإنهم لن يدركوا أى تغير ، فمجموع الزوايا فى المثلثات الصغيرة ستساوى ١٨٠ درجة ، وستظل نسبة نصفى قطرى دائرتين صغيرتين متحدتين فى المركز كنسبة محيطيهما . وستكون الرحلة فى خط مستقيم غير مؤدية إلى نقطة الابتداء فى رأيهم .

ولكن لنفرض أن هذه الأشباح قد أخذت بمرور الوقت فى تنمية معلوماتها

الفتية والعلمية فاكشفوا وسائل للمواصلات تمكنهم من قطع المسافات الطويلة بسرعة . فسرعان ما وجدوا حينئذ أنه عند بدء رحلة في خط مستقيم سيرجعون في النهاية إلى حيث بدأوا . وسيمنى الخط المستقيم الدائرة الكبيرة للكرة . وستجد هذه الأشباح أيضاً أن نسبة محيطي الدائرتين المتحدتين في المركز ليست مساوية لنسبة نصفي القطرين ، إذا كان أحد نصف القطرين صغيراً والآخر كبيراً .

فإذا كانت مخلوقاتنا ذات البعدين محافظة وكانت قد تعلمت الهندسة الإقليدية منذ أجيال ماضية عندما لم يكن في استطاعتها السفر بعيداً وعندما كانت هذه الهندسة منطبقة على الحقائق العلمية ، فانهم سيحاولون جاهدين التمسك بها رغم نتائج قياساتهم . سيحاولون نسبة تلك الاختلافات إلى أسباب طبيعية كتغيرات في درجة الحرارة تؤدي إلى تغير أشكال الخطوط المستقيمة وتسبب خرق قواعد هندسة إقليدس . ولكنهم سيجدون إن أجلاً أو عاجلاً أن هناك طريقاً أقرب إلى المنطق لوصف تلك الحوادث . سوف يدركون أن عالمهم محدود ذو قواعد هندسية تختلف عن تلك التي تعلموها . سيفهمون أنه على الرغم من عجزهم عن تخيل ذلك فإن عالمهم هو سطح كرة ثنائي الأبعاد . وسرعان ما سيتعلمون قواعد هندسية جديدة ستكون - على الرغم من اختلافها عن هندسة إقليدس - مصاغة في قالب منطقي مقبول ، تنطبق على عالمهم ذي البعدين . وفي رأى جيل جديد ، درج على معرفة هندسة الكرة ستظهر هندسة إقليدس القديمة أكثر تعقيداً وغير طبيعية لأنها لا تتفق مع الحقائق العملية .

لنرجع الآن إلى مخلوقات عالمنا ذات الأبعاد الثلاثة .

ماذا نعني بقولنا إن العالم ذا الأبعاد الثلاثة له طابع إقليدي ؟ معنى ذلك أننا نستطيع بالتجربة المباشرة إثبات جميع نظريات هندسة إقليدس المنطقية . ويمكننا بفضل استخدام الأجسام المتماثلة أو الأشعة الضوئية تكوين أو بناء أجسام تشبه الأجسام المثالية في هندسة إقليدس . فحافة المسطرة أو الشعاع الضوئي تشبه الخط المستقيم ، وجميع زوايا المثلث المكون من قضبان متماثلة يساوي ١٨٠ درجة ، ونسبة نصفي أقطار دائرتين متحدتين في المركز ومصنوعتين من سلك دقيق تساوي

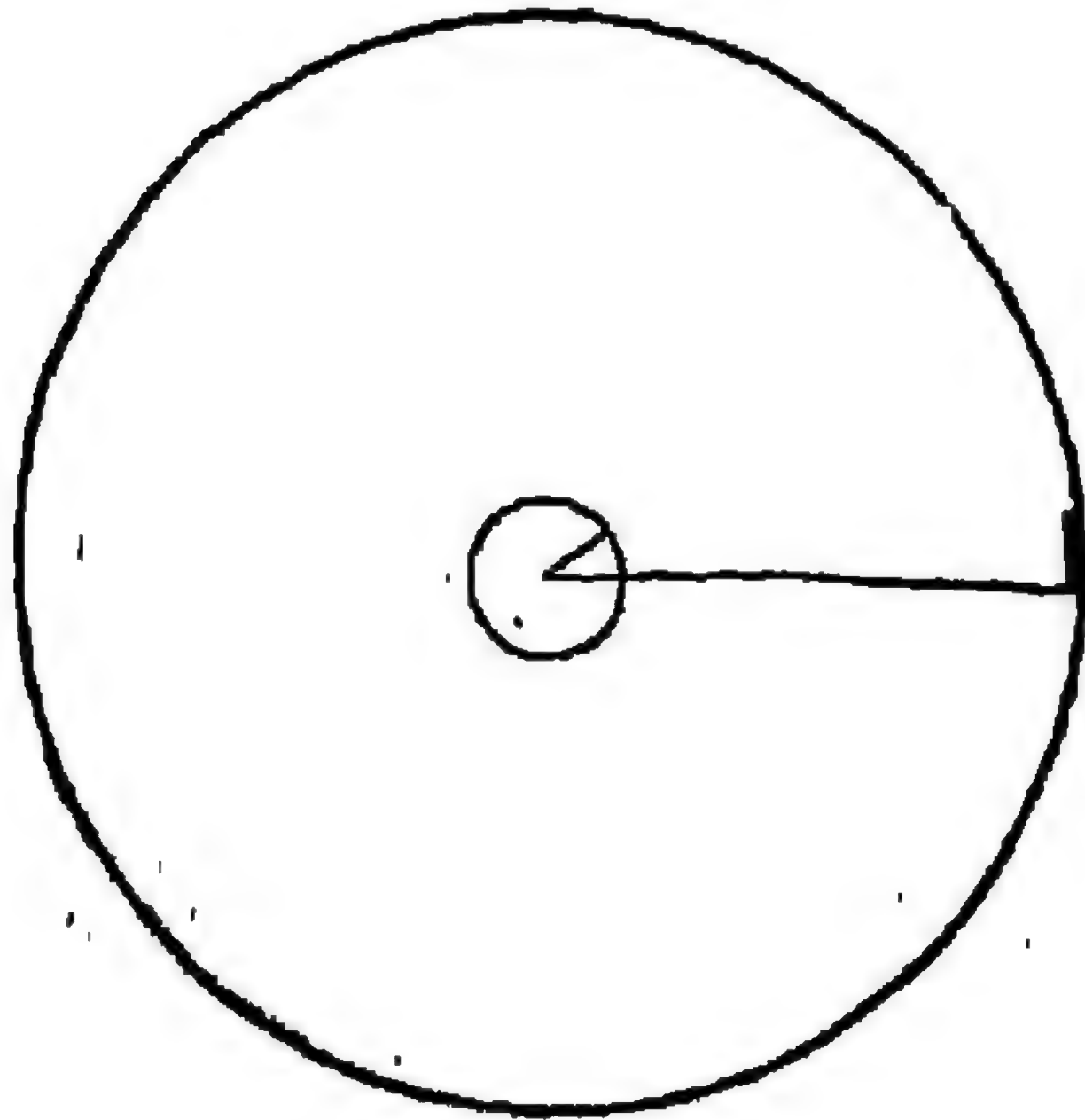
النسبة بين طول المحيطين ، فهذه الطريقة تصبح هندسة إقليدس فصلاً من علم الطبيعة . ولكننا نستطيع تخيل إكتشاف انحرافات ، فمثلاً مجموع زوايا مثلث كبير مصنوع من قضبان صلبة متماسكة يختلف عن 180° . ولكي ننقذ هندسة إقليدس يجب أن نفرض أن الأجسام ليست صلبة تماماً وبأنها لا تصلح لكي نستخدمها في تمثيل هندسة إقليدس . وسنحاول أن نوجد للأجسام تمثيلاً أفضل يتفق مع مبادئ هندسة إقليدس . فإذا لم ننجح في الربط بين هندسة إقليدس وعلم الطبيعة في صورة بسيطة مقبولة فإن علينا أن ننبذ فكرة كون فضاءنا إقليدياً ، ونبحث عن صورة أكثر تناسقاً في تمثيل الحقيقة وتحتوى على افتراضات عامة . متعلقة بالخواص الهندسية لفضاء عالمنا .

ويمكننا التدليل على ضرورة ذلك بتجربة مثالية تثبت لنا ، أنه لكي يكون لعلم الطبيعة خواص نسبية حقيقية يجب ألا نبنيه على أساس الخواص الإقليدية . وستطلب دراستنا نتائج معروفة خاصة بالمجموعات الإحداثية القاصرة ونظرية النسبية الخاصة .

لتتصور قرصاً كبيراً مرسوماً عليه دائرتان متحدتان المركز ، إحداها صغيرة والأخرى كبيرة جداً ، ولنفرض أن القرص أخذ يدور بسرعة كبيرة بالنسبة لمشاهد خارجي في حين أن هناك مشاهداً آخر مستقراً فوق هذا القرص . سنفرض أيضاً أن مجموعة المشاهد الخارجى الإحداثية مجموعة قاصرة وأنه رسم في مجموعته الإحداثية نفس الدائرتين الصغيرى والكبرى . وحيث أن الهندسة الإقليدية تتحقق في مجموعته ، فإنه سيجد أن نسبة المحيطين ستساوى نسبة نصف القطرين . أما بخصوص المشاهد المستقر فوق القرص فإن علم الطبيعة الكلاسيكى وكذلك النظرية النسبية الخاصة لا تسمح لنا باتباع مثل هذه المجموعات الاحداثية ، ولكن إذا رغبتنا في البحث عن صيغ جديدة للقوانين الطبيعية تتحقق في أية مجموعة احداثية فإننا يجب أن نهتم بدراسة وجهات نظر المشاهدين الداخلى والخارجى على حد سواء . ونحن هنا في الخارج نرغب المشاهد الداخلى في محاولته لقياس طول محيط ونصف قطر كل من الدائرتين على القرص الدائر ، باستخدام نفس قضيب القياس الصغير الذى يستخدمه المشاهد الخارجى . وكلمة « نفس » هنا تعنى إما حقيقة نفس

المقياس بأن يتسلمه المشاهد الداخلى من الخارجى أو بأنه كان أحد مقياسين لهما نفس الطول فى مجموعة إحداثية ساكنة .

سيبدأ المشاهد الداخلى من فوق القرص بقياس نصف القطر والمحيط للدائرة الصغيرة ويجب أن تتفق نتيجته مع نتيجة المشاهد الخارجى . وحيث أن محور دوران القرص يمر خلال مركز القرص فإن أجزاء القرص القريبة من المركز ستكون ذات سرعة بسيطة جداً . فإذا كانت الدائرة الصغيرة ذات نصف قطر صغير جداً فإننا يمكننا تجاهل النظرية النسبية الخاصة واستخدام الميكانيكا الكلاسيكية، وينتج من ذلك أن قضيب القياس سيكون له نفس الطول بالنسبة للمشاهدين الداخلى والخارجى وأن نتيجة القياس ستكون واحدة بالنسبة لكليهما . لنفرض الآن أن المشاهد الداخلى قد بدأ فى قياس نصف قطر الدائرة الكبيرة ووضع المقياس فعلاً على نصف القطر مستمراً فى عملية . سيرى المشاهد الخارجى أن قضيب القياس يتحرك فى اتجاه عمودى على طوله وبذا لن يعانى انكماشاً فى الطول وسيظل كما هو، أى ثابتاً بالنسبة لجميع المشاهدين أى أن ثلاثاً من الأربعة كميات التى نريد قياس أطوالها لن تتأثر بحركة دوران القرص وهى نصف القطرين ومحيط الدائرة الصغيرة ولكن الحالة ليست كذلك بالنسبة للكمية الرابعة ! فسيكون طول محيط الدائرة الكبيرة مختلفاً بالنسبة للمشاهدين . فعند وضع قضيب القياس على المحيط فى اتجاه الحركة سينكمش طوله بالنسبة للمشاهد الخارجى - أى بالنسبة إلى قضيب مقياسه - فى مجموعته الساكنة . وحيث أن السرعة كبيرة جداً بالنسبة لحالة الدائرة الصغيرة



فإننا لا يمكننا التغاضى عن هذا الانكماش . فإذا استخدمنا نتائج نظرية النسبية الخاصة فإن استنتاجنا سيكون : إن نتائج قياس محيط الدائرة الكبيرة ستكون مختلفة بالنسبة للمشاهدين الداخلى والخارجى . وحيث أن إحدى الأطوال الأربعة المراد

قياسها ، فقط قد اختلفت ، فإن نسبة نصفي القطرين لا يمكن أن تساوى نسبة محيطى الدائرتين بالنسبة لكل من الشاهدين الداخلى والخارجى . ومن هذا ينتج أن هندسة إقليدس لا يمكن أن تنطبق على حالة القرص الدائر .

وعند الوصول إلى هذه النتيجة يمكن للمشاهد المستقر فوق القرص أن يعترض بقوله أنه يود اعتبار المجموعة الإحداثية التى لا تتحقق فيها هندسة إقليدس . وينسب عدم انطباق هندسة إقليدس إلى الحركة الدورانية المطلقة ؛ إلى حقيقة كون مجموعته الإحداثية مجموعة غير مقبولة وغير مسموح لنا استخدامها . ولكن الاعتراض بهذه الطريقة ينطوى على رفض المشاهد الداخلى قبول الفكرة الأساسية للنظرية العامة للنسبية . ومع ذلك فإذا رغبتنا فى نبذ الحركة المطلقة واتباع آراء النظرية العامة للنسبية فإن علم الطبيعة يجب أن يبنى على أساس نوع من الهندسة يكون أكثر تعميماً من هندسة إقليدس . وليست هناك طريقة ما للتخلص من هذه النتيجة ما دام من المسموح به استخدام جميع المجموعات الإحداثية .

والتغيرات التى استحدثتها نظرية النسبية العامة لاتنحصر فى المكان وحده . وقد كان لدينا فى النظرية النسبية الخاصة ساعات متشابهة تماماً وتدور بكيفية واحدة وكانت مثبتة فى كل مجموعة إحداثية . ولعلنا نتساءل الآن عما يحدث لساعة تابعة لمجموعة إحداثية غير قاصرة : سترجع ثانية إلى مثال القرص الدائر ونحاول استخلاص الإجابة . سيكون فى حوزة المشاهد الخارجى مجموعة من الساعات المضبوطة والوحدة التقدير ، مثبتة فى مجموعته القاصرة . سيأخذ المشاهد الداخلى ساعتين من نفس النوع وسيضع إحداها على الدائرة الداخلية الصغيرة والأخرى على الدائرة الخارجية الكبيرة . سيكون للساعة المثبتة فى الدائرة الصغيرة سرعة صغيرة جداً بالنسبة للمشاهد الخارجى ويمكننا إذن أن نقول بأن نظام توقيتها سيكون مشابهاً لتوقيت ساعة المشاهد الخارجى . ولكن سرعة الساعة المثبتة فى الدائرة الكبيرة سرعة كبيرة جداً ، ولذا فإن نظام توقيتها سيختلف كثيراً عن توقيت ساعات المشاهد الخارجى ، وإذن ستختلف أيضاً عن توقيت الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة . وإذن سيكون نظام توقيت الساعتين الدائرتين مختلفاً ،

وبتطبيق نتائج نظرية النسبية الخاصة نرى أنه في مجموعتنا الإحداثية ذات الحركة الدورانية لا يمكننا عمل ترتيبات مشابهة لتلك الموجودة في مجموعة إحداثية قاصرة . ولايضاح الاستنتاجات التي يمكننا الحصول عليها من هذه التجربة ومن مثيلاتها السابقة سنذكر جانباً من الحديث الذي سبق ذكر بعضه بين العالم الطبيعي القديم « ه » الذي يؤمن بالطبيعة الكلاسيكية وبين العالم الطبيعي الحديث « ح » الذي يعرف نظرية النسبية العامة . و « ه » هو المشاهد الخارجي في المجموعة الإحداثية القاصرة بينما « ح » هو المشاهد المقيم فوق القرص الدائر .

« ه » : لا تتحقق الهندسة الإقليدية في مجموعتك الإحداثية . لقد شاهدت قياساتك وأوافقك على أن نسبة طول المحيطين في مجموعتك الإحداثية ليست مساوية للنسبة بين نصفي القطرين . ولكن هذا يثبت أن مجموعتك الإحداثية مجموعة غير مسموح بها . أما مجموعتي فتتميز بطابع القصور الذاتي . ويمكنني استخدام هندسة جاليليو دون أى تفكير . والقرص الذي يدور بك ذو حركة مطلقة وإذن فهو يمثل مجموعة إحداثية غير مقبولة من وجهة النظر الكلاسيكية ، لا تتحقق فيها قوانين الميكانيكا .

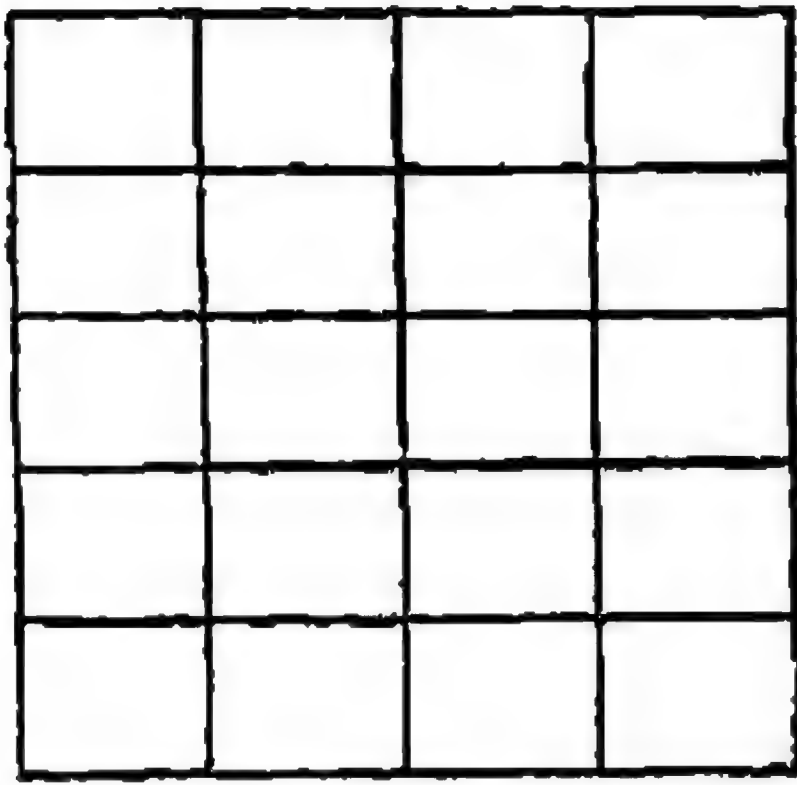
« ح » : لا أود سماع أى شيء يتعلق بالحركة المطلقة ، وتستوى مجموعتي الإحداثية مع مجموعتك سواء بسواء ، لا فرق بينهما . وقد نشأ ملاحظته عن حركة قرصك الدورانية بالنسبة للقرص الذي أقيم عليه . وليس هناك ما يمنعني من أن أنسب كل الحركات إلى القرص الذي أعيش فوقه .

« ه » : ولكن ألا تشعر بقوة غريبة تحاول دفعك بعيداً عن مركز القرص ؟ فلو لم يكن قرصك دائراً بسرعة كبيرة فإن ملاحظته ما كان ليحدث أبداً . فإنك ما كنت تشعر بالقوة التي تدفعك إلى الخارج كما أنك ما كنت لتلاحظ أن هندسة إقليدس لا تنطبق في مجموعتك الإحداثية ، أما تعتقد أن في هذه الحقائق ما يكفي لإقناعك بأن مجموعتك الإحداثية في حركة مطلقة ؟

« ح » : كلا . كلا ! إني حقاً قد لاحظت الظاهرتين اللتين أشرت إليهما

ولكننى أعتقد أن هناك مجالا غريباً للجاذبية يؤثر على القرص ويعتبر مسئولا عن ظهور هاتين الظاهرتين ، ويسبب اتجاه مجال الجاذبية إلى خارج القرص تغيراً فى شكل القضبان المتأسكة ويؤثر على نظام توقيت الساعات التى أستخدمها . وإنى أعتقد أن مجال الجاذبية والهندسة غير الأقليدية والساعات ذات التوقيت المختلف كلها مرتبطة ببعضها ارتباطاً وثيقاً . ولكى تصبح مجموعتى الإحداثيه مقبولة يجب على نفس الوقت أن أفرض وجود مجال مناسب للجاذبية ذى تأثير على القضبان المتأسكة والساعات .

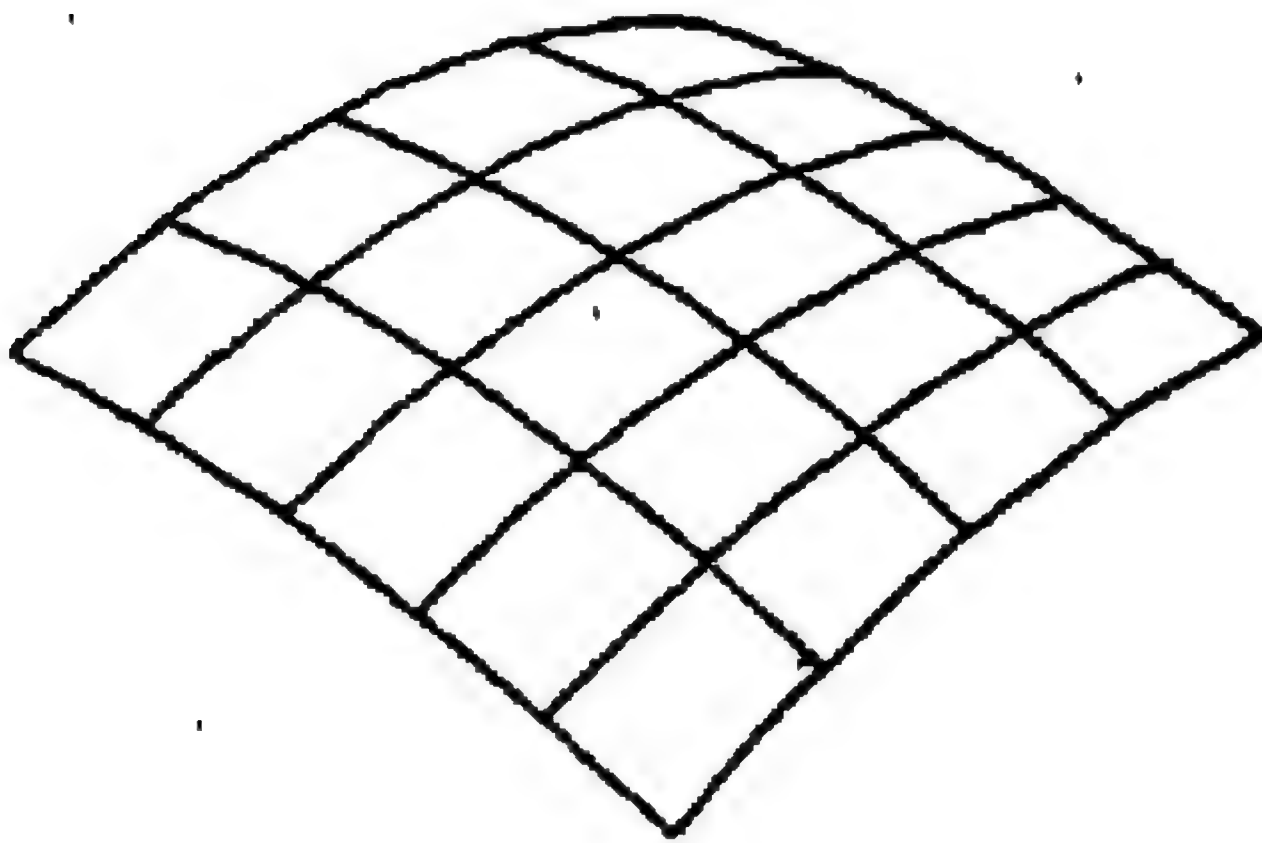
« ١٠ » : ولكن هل أنت متنبه إلى الصعوبات النسبية عن نظريتك العامة للنسبية ؟ ولكى أوضح ما أرمى إليه سأسوق مثالا لا يمت بصلة إلى علم الطبيعة . لتصور مدينة أمريكية مثالية تتكون من شوارع متوازية وأخرى عمودية عليها ، مع فرض أن المسافة بين كل شارعين واحدة فى جميع الحالات . وإذن تكون مجموعات المباني متماثلة دائماً فى الشكل . وبهذه الطريقة يمكننى بسهولة تمييز موقع أى مجموعة من مجموعات المباني ، ولكن مثل هذا النظام سيكون مستحيلا بدون هندسة إقليدس . فمثلا لا يمكننى تقسيم سطح الأرض كله بنفس الطريقة التى قسمنا بها مساحة المدينة الأمريكية . ونظرة واحدة إلى خريطة العالم تقنعنا بهذا . وكذلك لا يمكننا تقسيم القرص الذى نعيش عليه بنفس الطريقة . وأنت تدعى أن مجال الجاذبية يؤثر على أبعاد قضبانك ، ولا شك أن هجرك عن إثبات نظرية إقليدس الخاصة بتساوى نسبة أنصاف الأقطار ومحيطات الدوائر ليثبت لك بوضوح أنك إذا قت بمثل هذا التقسيم للشوارع فإنك ستقابل إن آجلا أو عاجلا صعاباً كثيرة وستجد أن مثل هذا العمل لا يمكن القيام به على سطح القرص . والهندسة التى تتبعها على قرصك الدائر تشبه هندسة السطح المنحنى حيث لا يمكننا إقامة مثل هذا النظام على بقعة كبيرة من السطح . ولذكر مثال ذى صلة بعلم الطبيعة سنعتبر مستوى يسخن بغير انتظام فى نقاط مختلفة من سطحه . فهل يمكنك بواسطة استخدام قضبان حديدية صغيرة متعددة فى الطول بتأثير الحرارة ، إتمام عملية تقسيم المستوى إلى شوارع متوازية وأخرى متعامدة كالرسومة فى الشكل



المرفق ؟ بالطبع لا ! إن مجال الجاذبية الذي تفرضه
يؤثر على قضبانك كتأثير التغير في درجة الحرارة
على القضبان الحديدية الصغيرة .

« ح » : كل هذا لا يروعي . إن الغرض
من نظام الشوارع المتوازية والمتعامدة كان لتعيين

أماكن النقاط ، وتستخدم الساعة لتنظيم وقوع الأحداث ولا يلزم أن تكون
المدينة أمريكية ، بل قد تكون مدينة أوربية قديمة . لنفرض أن مدينتنا المثالية
قد صنعت من الصلصال ثم غيرت أشكالها بعد ذلك . سأستطيع مع ذلك أن
أذكر مجموعات المنازل والشوارع المتوازية والأخرى المتعامدة على الرغم من أنها
لم تعد متوازية وعلى أبعاد متساوية من بعضها . وبالمثل ترمز خطوط الطول والعرض
على سطح أرضنا إلى أوضاع النقاط رغماً عن عدم وجود « نظام تقسيم المدينة
الأمريكية » .



« ه » : ما زالت هناك
صعوبة . فأنت مضطر دائماً إلى
إلى استخدام « نظام المدينة
الأوربية » ، وأنا أوافقك على
أنه يمكنك تنظيم النقاط أو
الأحداث ، ولكن هذا التنظيم

سيحدث اضطراباً في جميع قياسات المسافات ، ولن يعطيك الخواص القياسية
للعالم كما هي الحالة في التنظيم الذي سبق أن ذكرته . فمثلاً في مدينتي الأمريكية ،
لكي تقطع مسافة متكافئة لعشرة مجموعات بنائية ، يجب أن تسير ضعف مسافة
خمس مجموعات . وحيث أنني أعلم أن جميع المجموعات متساوية فسأستطيع تعيين
المسافات على الفور .

« ح » : هذا صحيح ؛ ففي « نظام مدينتي الأوربية » لا أستطيع قياس
المسافات فوراً بعدد المجموعات ذات الأشكال المتغيرة . ويجب أن أعرف شيئاً

أكثر ، يجب أن أعرف الخواص الهندسية للسطح . فكما نعرف أن المسافة عند خط الاستواء بين خطي الطول 0° ، 10° لا تساوي المسافة بين 0° ، 10° عند القطب الشمالي ، فإنه في استطاعة كل بحار أن يعرف المسافة بين مثل هاتين النقطتين على سطح الأرض لأنه يعرف خواصها الهندسية . ويمكنه عمل ذلك إما بطريق الحساب المبني على أساس معرفته لحساب المثلثات الكرى أو عملياً بقياس المسافة بواسطة تحريك سفينته بسرعة ثابتة في كلا المسافتين . أما في حالتك فالمسألة جد بسيطة ، لأن كل الشوارع تبعد عن بعضها بنفس المسافة . والأمور أكثر تعقيداً على سطح الأرض لأن خطي الزوال 0° ، 10° يتقابلان عند قطب الأرض الشمالي ، وتبلغ المسافة بينهما نهايتها العظمى عند خط الاستواء . وبالمثل في حالة « نظام مدينتي الأوربية » يجب أن أعرف شيئاً أكثر مما نعرفه في حالة مدينتك الأمريكية « لكي أقدر المسافات . ويمكنني معرفة هذه المعلومات الإضافية بدراسة الخواص الهندسية لعالمى في كل حالة خاصة .

« ب » : ولكن هذا كله يهدف إلى إظهار الصعوبات والتعقيدات التي تنشأ عند نبذ النظام البسيط الناتج عن هندسة إقليدس ، واتباع نظام السقالة المعقد الذي لا بد لك من استخدامه . فهل هناك ضرورة لذلك ؟

« ح » : نعم لا مفر من ذلك ، إذا أردنا تطبيق علم الطبيعة على أية مجموعة إحدائية ، دون الإشارة إلى المجموعة الإحدائية القاصرة المهمة . وأنا أوافقك على أن وسائل الرياضيات أكثر تعقيداً من وسائلك ، ولكن فروض الطبيعة أكثر بساطة وأقرب إلى الطبيعة من فروضك .

وقد انحصرت دراستنا حتى الآن في العالم ذي البعدين . ويتركز اهتمام النظرية العامة للنسبية في عالم أكثر تعقيداً ، هو عالم الزمان والمكان ذو الأربعة الأبعاد . ولكن الآراء والمعتقدات هي نفسها التي ذكرناها في حالة البعدين . ولا يمكننا استخدام « السقالة الميكانيكية » ذات القضبان المتوازية والمتعامدة والساعات المضبوطة في نظرية النسبية العامة ، كما في نظرية النسبية الخاصة . وفي أية مجموعة إحدائية لا يمكننا تعيين النقطة واللحظة اللتين يقع عندهما الحدث ، باستخدام

قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد ، كما هي الحال في المجموعة الإحداثية القاصرة المفروضة في نظرية النسبية الخاصة . ولكن يمكننا تنظيم الأحداث بواسطة قضباننا غير الإقليدية وساعاتنا ذات التوقيت المختلف . ولكن القياسات الفعلية التي تحتاج إلى قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد ، يمكن عملها فقط في المجموعات الإحداثية القاصرة المحلية . وتتحقق نظرية النسبية الخاصة في هذه المجموعات الأخيرة ، ولكن مجموعتنا الإحداثية الصحيحة محلية فقط وخواصها القاصرة محدودة في المكان والزمان . ويمكننا التنبؤ في أية مجموعة إحداثية بنتائج القياسات التي تقوم بها في المجموعة الإحداثية القاصرة . ولعمل ذلك يجب أن نعرف الخواص الهندسية لعالمنا المكاني — الزماني .

وتوضح لنا تجاربنا المثالية فقط الخواص العامة لعلم الطبيعة النسبي الحديث ، وتظهر لنا هذه التجارب أن موضوعنا الرئيسي هو الجاذبية ، وأن النظرية العامة للنسبية تؤدي إلى تعميم أكبر لمعتقدات المكان والزمان .

النسبية العامة وتحققها :

تحاول النظرية العامة للنسبية صياغة القوانين الطبيعية لكي تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية . والموضوع الأساسي للنظرية هو الجاذبية . وتبذل النظرية أول محاولة جدية — منذ عهد نيوتن — لصياغة قانون الجاذبية ، فهل هذا ضروري ، مع ما نلصقه من انتصارات نظرية نيوتن والتقدم الكبير في علم الفلك المبني على أساس قانون نيوتن للجاذبية ؟ ومع أن هذا القانون ما يزال يعتبر حتى الآن أساساً لكل الحسابات الفلكية . ومن ناحية أخرى لا تخفى علينا الاعتراضات على هذه النظرية القديمة .

ويتحقق قانون نيوتن فقط في المجموعة الإحداثية القاصرة لعلم الطبيعة الكلاسيكي ، أي في المجموعات الإحداثية التي يشترط فيها — كما نذكر — تحقيق قوانين الميكانيكا . وتتوقف القوة الموجودة بين كتلتين على المسافة الموجودة بينهما . والعلاقة الموجودة بين القوة والمسافة هي كما نعلم لازمة — أي لا تتغير: — بالنسبة

للتحويلات الكلاسيكية . ولكن هذا القانون لا يتفق ونظرية النسبية الخاصة . فليست المسافة لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز . ويمكننا أن نحاول — كما فعلنا بنجاح في حالة قوانين الحركة — تعميم قانون الجاذبية لكي نجعله يتفق مع نظرية النسبية الخاصة أو بعبارة أخرى نصوغه بحيث يكون لازماً بالنسبة لتحويلات لورنتز ، لا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . ولكن قانون نيوتن للجاذبية قاوم بعناد جميع الجهود التي بذلت لتبسيطه وجعله متمشياً مع نظرية النسبية الخاصة . وحتى إذا فرضنا نجاحنا في ذلك فإن هناك خطوة أخرى ضرورية لا بد منها : هي الانتقال من المجموعة الإحداثية الاختيارية إلى نظرية النسبية العامة . ومن جهة أخرى فإننا نرى بوضوح من التجارب المثالية المتعلقة بالمصدر الساقط أنه لا مندوحة لنا من حل مشكلة الجاذبية لكي نتمكن من صياغة نظرية النسبية العامة . ويتضح لنا من دراستنا سبب اختلاف حل موضوع الجاذبية في علم الطبيعة الكلاسيكي عنه في النسبية العامة .

وقد حاولنا إيضاح الطريق المؤدى إلى النظرية العامة للنسبية والأسباب التي تدفعنا مرة أخرى إلى تغيير آرائنا القديمة . وسنحاول — دون أن ندخل في تفاصيل التركيب الرياضى للنظرية — إظهار بعض خصائص لنظرية الجاذبية الجديدة تميزها عن النظرية القديمة . ولن يكون من العسير علينا التنبه إلى طبيعة هذه الفروق نظراً لما سبق لنا إيضاحه :

١ — يمكن تطبيق معادلات الجاذبية لنظرية النسبية العامة في أى مجموعة إحداثية . وسيكون لأى شخص حرية اختيار المجموعة الإحداثية المناسبة في أى مسألة خاصة . وستكون كل المجموعات الإحداثية شكلياً سواء في نظرنا . وإهمال الجاذبية نرجع أوتوماتيكياً إلى المجموعة الإحداثية القاصرة في النظرية النسبية الخاصة .

٢ — يربط قانون نيوتن للجاذبية بين حركة جسم في لحظة ما بمكان معين وبين فعل جسم آخر في نفس اللحظة على مسافة بعيدة من الجسم الأول . وهذا

هو القانون الذى وضع لنا أساس نظريتنا الميكانيكية كلها . ولكن النظرية الميكانيكية قد انهارت ، ولسنا فى قوانين ما كسويل نظاماً جديداً لقوانين الطبيعة . ومعادلات ما كسويل هى قوانين بنائية ، إذ أنها تربط الأحداث التى تقع الآن فى مكان ما بتلك التى ستحدث بعد فترة وجيزة فى نقطة قريبة . وهى تؤدي إلى القوانين التى تصف التغيرات فى المجال الكهرومغناطيسى . ومعادلات الجاذبية الجديدة هى أيضاً معادلات بنائية تصف التغيرات فى مجال الجاذبية . ويمكننا القول بأن الانتقال من قانون نيوتن للجاذبية إلى النسبية العامة يشبه لحد ما الانتقال من الموائع الكهربائية وقانون كولوم إلى نظرية ما كسويل .

(٣) وليس عالمنا إقليدياً ، وتكيف طبيعته الهندسية بالكتل الموجودة وسرعها . وتحاول معادلات الجاذبية فى نظرية النسبية العامة إظهار الخواص الهندسية للعالم .

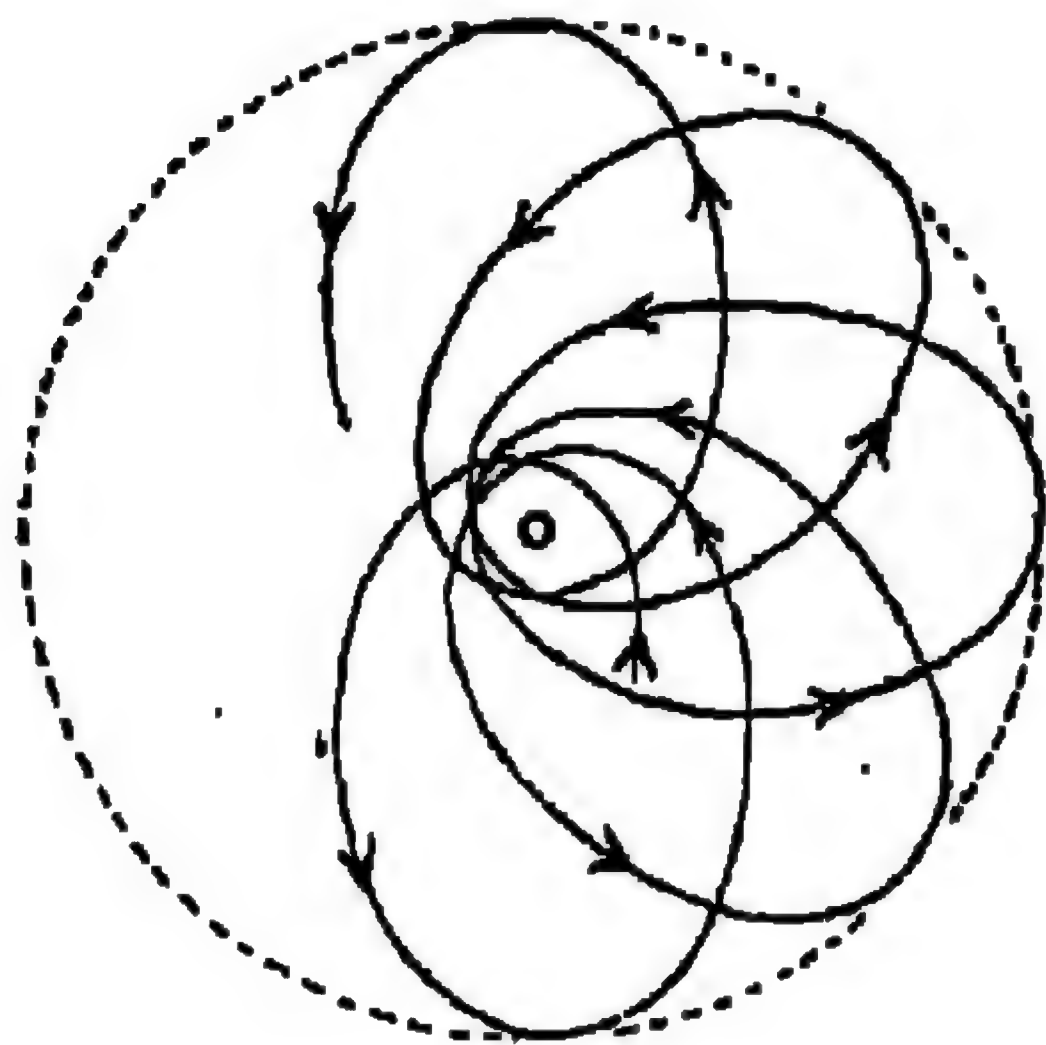
ولنفرض الآن أننا نجحنا فى إتمام برنامج نظرية النسبية العامة . ولكن ألسنا فى خطر الحصول على استنتاجات قد تكون بعيدة عن الحقيقة ، ونحن نعلم أن النظرية القديمة تشرح تماماً المشاهدات الفلكية ؟ هل يمكننا مطابقة النظرية الجديدة بالمشاهدات العملية ؟ ويجب تحقيق كل نتائج نظرية النسبية عملياً ، ونبدأ بـ نتائج — مهما كانت شائعة وجذابة — إذا كانت تتعارض مع الحقائق العملية . وماذا كانت نتيجة مقارنة نظرية الجاذبية الجديدة بالحقائق العملية ؟ يمكننا الإجابة على هذا السؤال بعبارة واحدة : النظرية القديمة هى حالة خاصة نهائية للنظرية الجديدة . فإذا كانت القوى الجاذبية ضعيفة نسبياً ، فإن قانون نيوتن القديم يصبح قريباً جداً من قانون الجاذبية الجديد . وإذن ينتج أن النتائج التى تؤيد النظرية الكلاسيكية ستؤيد أيضاً النظرية العامة للنسبية . وهما نحن قد توصلنا ثانية إلى النظرية القديمة عن طريق النظرية الجديدة .

وحتى على فرض عدم وجود مشاهدات إضافية تؤيد النظرية الجديدة ، وإذا كانت شروحاتها صالحة تماماً مثل القديمة وكان علينا أن نختار بين النظريتين فإنه

يجب علينا بلا شك أن ننحاز إلى جانب النظرية الجديدة . ومعادلات النظرية الجديدة هي أكثر تعقيداً من الواجهة الشككية ولكن فروضها ، من وجهة نظر الافتراضات الأساسية ، أكثر سهولة . فقد اختفى الشبحان الخيفان : الزمن المطلق والمجموعة القاصرة ؛ ولم تتناض عن تكافؤ الكتلتين القاصرة والجاذبية ؛ ولن نحتاج إلى فرض بخصوص القوى الجاذبية وتوقفها على المسافة ، ولعادلات الجاذبية شكل القوانين البنائية وهو الشكل المطلوب لجميع القوانين الطبيعية منذ الانتصارات الرائعة لنظرية المجال .

وقد أمكننا الحصول على استنتاجات جديدة من قوانين الجاذبية الجديدة ، لايشملها قانون نيوتن للجاذبية . وإحدى هذه الاستنتاجات هي ظاهرة انحناء الأشعة الضوئية في مجال الجاذبية التي نوهنا عنها فيما سلف . وسنذكر الآن مثالين آخرين .

إذا كانت القوانين القديمة تنتج من الجديدة عند ما تكون القوى الجاذبية ضعيفة فإننا يمكننا توقع الانحراف عن قانون نيوتن للجاذبية فقط في حالة مجالات الجاذبية القوية . لنعتبر مجموعتنا الشمسية مثلاً . فالكواكب — بما فيها الأرض — تتحرك في مسارات حول الشمس على شكل قطاعات ناقصة . وأقرب هذه الكواكب إلى الشمس هو المشترى ، وإذن يكون التجاذب بين الشمس والمشتري أقوى من ذلك الموجود بين الشمس وأى كوكب آخر ، لأن بعده أقل من أبعاد الكواكب الأخرى . فإذا كان هناك أمل في إيجاد انحراف عن قانون نيوتن ، فإن احتمال وجوده يكون أقوى



في حالة المشترى . وينتج من النظرية الكلاسيكية أن مسار الكوكب المشترى لا يختلف في شيء عن مسار أى كوكب آخر سوى أنه أكثرها قرباً إلى الشمس أما في حالة النظرية النسبية العامة ، فيجب أن تكون الحركة مختلفة قليلاً . فلن

يتحرك المشتري حول الشمس في قطع ناقص فقط ، بل إن هذا القطع الناقص نفسه يجب أن يدور ببطء كبير بالنسبة لمجموعة الإحداثيات المثبتة في الشمس . ودوران القطع الناقص هو التأثير الجديد لنظرية النسبية العامة . وتعطينا النظرية مقدار هذه الظاهرة ، ولكي ندرك مقدار صغر هذا التأثير وعدم احتمال استطاعتنا إدراكه في حالة الكواكب البعيدة عن الشمس يكفي أن نذكر أن دورة خسوف المشتري تستغرق ثلاثة ملايين سنة !

وقد كان انحراف حركة الكوكب المشتري عن القطع الناقص معروفاً قبل نشوء نظرية النسبية العامة ، ولم يتمكن العلماء من وضع شرح له . بل على العكس نشأت النظرية العامة للنسبية دون التنبيه إلى هذا الموضوع الخاص ، ولكن فيما بعد ظهرت من معادلات الجاذبية الجديدة ، النتيجة الخاصة بدوران القطع الناقص أثناء حركة كوكب حول الشمس . وقد شرحت النظرية بنجاح انحراف الحركة عن قانون نيوتن في حالة المشتري .

وما زالت هناك نتيجة أخرى يمكننا استخلاصها من النظرية العامة للنسبية ومقارنتها بالتجربة . سبق أن رأينا أن ساعة موضوعة على الدائرة الكبيرة لقرص دائر تتميز بنظام توقيت مختلف عن نظام الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة . وبالمثل ينتج من نظرية النسبية أن ساعة موضوعة على الشمس سيكون لها نظام توقيت يختلف عن نظام الساعة الموجودة على سطح الأرض ، لأن تأثير مجال الجاذبية أقوى بكثير على الشمس منه على الأرض .

وقد لاحظنا (في صفحتي ٧٢ — ٨٣) أن الصوديوم المتوهج يشع ضوءاً أصفر متجانساً ذا طول موجي معين . وتكشف الذرة في هذا الإشعاع عن ناحية من حركتها الدورية . إذ أن الذرة تمثل ساعة يكون طول الموجة المشعة هو وحدة تقديرها للزمن . وإذن طبقاً لنظرية النسبية العامة يكون الطول الموجي للضوء الصادر من ذرة الصوديوم في سطح الشمس مثلاً ، أكبر قليلاً من الطول الموجي الصادر من ذرة الصوديوم الموجودة على سطح الأرض . ويعتبر تحقيق نتائج النظرية العامة للنسبية بالملاحظة مسألة معقدة ، وغير منتهية

حتى الآن . وحيث أننا نهتم بالأراء الأساسية فإننا لا ننوى أن تعمق كثيراً في هذا الموضوع بل يكفي أن نقول إن حكم التجربة يبدو حتى الآن مؤيداً للنتائج المستخلصة من نظرية النسبية العامة .

المجال والمادة :

رأينا فيما سبق سبب وكيفية فشل وجهة النظر الميكانيكية ، فقد كان من المستحيل شرح جميع الظواهر بفرض وجود قوى بسيطة بين جسيمات لا تتغير . وقد كان التوفيق حليف محاولتنا الأولى للتعلم إلى أبعد من الوجهة الميكانيكية وكذلك أصابت معتقدات المجال نجاحاً كبيراً في عالم الظواهر الكهرمغناطيسية ، ثم تمت بعد ذلك صياغة القوانين البنائية للمجال الكهرمغناطيسي ، وهي تربط بين الأحداث القريبة جداً من بعضها في المكان والزمان . وهذه القوانين تلائم بناء النظرية الخاصة للنسبية حيث أنها لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز . وبعد ذلك صاغت النظرية العامة للنسبية قوانين الجاذبية . وهذه أيضاً قوانين بنائية تصف مجال الجاذبية بين الجسيمات المادية . وقد كان من السهل تعميم معادلات ماكسويل بحيث يمكن استخدامها في أية مجموعة إحداثية ، كما حدث لقوانين الجاذبية في النظرية العامة للنسبية .

ولدينا حقيقتان : المادة والمجال . وليس هناك أدنى شك في أننا لا يمكننا أن نتخيل في الوقت الحاضر أن علم الطبيعة مبني كله على أساس المادة ، كما فعل علماء الطبيعة في أوائل القرن التاسع عشر . سنقبل الآن كلا الرأيين مؤقتاً . هل يمكننا أن نعتبر المادة والمجال حقيقتين متميزتين ومختلفتين ؟ فإذا كان لدينا جسيماً صغيراً من المادة . فإننا يمكننا البرهنة بطريقة سهلة أن هناك سطحاً خاصاً للجسيم ، لا تكون مادة الجسم موجودة به ، ولكن تظهر فيه آثار مجال جاذبيته . وخلال دراستنا اعتبرنا أن المنطقة التي تتحقق فيها قوانين المجال تنفصل تماماً بطريقة فجائية عن المنطقة التي توجد بها المادة . ولكن ماهي الخواص الطبيعية التي تميز كلا من المادة والمجال ؟ وقبل أن تظهر النظرية النسبية حاولنا الإجابة على هذا السؤال بالطريقة التالية : تتميز المادة بوجود

كتلة لها في حين أنه ليست للمجال كتلة . ويمثل المجال طاقة في حين تمثل المادة كتلة . ولكننا نعرف مما سبق أن مثل هذه الإجابة تعتبر غير كافية بالنسبة للمعلومات الحديثة . تنبئنا نظرية النسبية أن المادة تمثل خزان كبيرة من الطاقة وأن هذه الطاقة تمثل مادة . ولا يمكننا بهذه الطريقة التمييز ظاهرياً بين المادة والمجال لأن التفرقة بين الكتلة والطاقة ليست ممكنة شكلياً . ويتركز الجزء الأعظم من الطاقة في المادة ولكن المجال المحيط بالجسم يمثل طاقة أيضاً ولو أنها ذات قدر ضئيل نسبياً — وإذن يمكننا أن نقول : توجد المادة حينما يكون تركيز الطاقة عظيماً ، ويوجد المجال عند ما يكون تركيز الطاقة ضئيلاً . ولكن إذا كانت الحال كذلك فإن الفرق بين المادة والمجال هو مسألة تتوقف على مقدار الكمية الموجودة ، ولا معنى لاعتبار المادة والمجال صورتين مختلفتين كثيراً عن بعضهما . ولا يمكننا أن نتخيل سطحاً معيناً يفصل المجال تماماً عن المادة .

وتنشأ نفس الصعوبة في حالة الشحنة الكهربائية ومجالها . ويبدو من المستحيل أن نعطي خواصاً شكلية واضحة للتمييز بين المادة والمجال أو الشحنة والمجال . وقوانيننا البنائية أى قوانين ماكسويل وقوانين الجاذبية لا تنطبق على حالات تركيز الطاقة الكبيرة جداً أو عند أماكن وجود مصادر المجال ، أى الشحنات الكهربائية أو المادة . ولكن هل يمكننا تحويل معادلاتنا بحيث تصبح صحيحة في كل مكان حتى في المناطق التي تكون فيها الطاقة مركزة جداً ؟

لا يمكننا بناء علم الطبيعة على أساس المادة فقط ، ولكن الانقسام إلى مادة ومجال ، بعد إدراك التكافؤ بين الكتلة والطاقة ، يعتبر شيئاً مصطنعاً وغير واضح تماماً . فهل يمكننا نبذ فكرة المادة وبناء علم الطبيعة على أساس المجال؟ وأن يكون ما يؤثر على إحساساتنا كمادة ليس في الحقيقة سوى تركيز عظيم جداً للطاقة في حيز صغير ؟ ويمكننا اعتبار أن المادة هي تلك المناطق من الفضاء الذي يكون المجال ذا تركيز كبير فيها . ويمكننا بهذه الطريقة تكوين رأى فلسفى جديد ، يهدف إلى شرح جميع أحداث الطبيعة ، بواسطة قوانين بنائية تتحقق دائماً في كل مكان . ومن وجهة النظر هذه ، يكون « الحجر المقدوف في الهواء » مجالاً متغيراً

ذا شدة كبيرة يتحرك في الفضاء بسرعة الحجر . ولن يكون هناك مكان في علم الطبيعة الحديث لكلا المجال والمادة ، فالمجال هو الحقيقة الوحيدة . وتدفعنا إلى هذا الرأي الانتصارات العظيمة التي أحرزتها معتقدات المجال في علم الطبيعة وكذلك نجاحنا في صياغة قوانين الكهرباء والمغناطيسية والجاذبية على شكل قوانين بنائية ، ثم التكافؤ بين المادة والطاقة . وستكون مشكلتنا الأخيرة هي تحويل قوانين المجال بشكل يجعلها تظل متحققة في المناطق التي تكون الطاقة فيها مركزة جداً .

ولكننا لم ننجح حتى الآن في بلوغ هذا الهدف بطريقة مقبولة ومرضية ، ونترك للمستقبل الحكم فيما إذا كان في الإمكان تحقيق هذا الغرض . وحتى الآن يجب أن نستمر في فرض وجود المادة والمجال في جميع دراستنا . وما زالت أمامنا مسائل أساسية . فنحن نعلم أن المادة مكونة من أنواع قليلة فقط من الجسيمات . كيف تتكون المادة في صورها المختلفة من هذه الجسيمات المختلفة ؟ كيف تتفاعل هذه الجسيمات الصغيرة مع المجال ؟ وللإجابة على هذه الأسئلة وضعت آراء جديدة في علم الطبيعة هي : معتقدات نظرية الكم .

تلخيص .

ظهر في علم الطبيعة أعظم اختراع منذ عهد نيوتن وهو المجال . وقد احتاج العلماء إلى خيال علمي كبير ليدركوا أن المجال (الوجود في الفراغ بين الشحنات أو الجسيمات) ، وليست الشحنات أو الجسيمات نفسها ، أساسى جداً لوصف الظواهر الطبيعية . وقد نجحت فكرة المجال نجاحاً كبيراً وأدت إلى صياغة معادلات ماكسويل التي تصف بناء المجال الكهرمغناطيسى والتي تتحكم في الظواهر الكهربائية والضوئية .

وتنشأ نظرية النسبية من مشاكل المجال . فقد دفعنا التناقض بين النظريات القديمة إلى الحاق أوصاف جديدة لعالم المكان والزمان الذي تقع فيه جميع أحداث العالم الطبيعي .

وقد تكونت نظرية النسبية على خطوتين ، أدت الأولى منهما إلى مانسميه بالنظرية الخاصة للنسبية التي تنطبق فقط على المجموعات الإحداثية القاصرة أى على المجموعات التي يتحقق فيها قانون القصور الذاتى كما وضعه نيوتن . وتُبنى نظرية النسبية الخاصة على فرضين أساسين وهما أن قوانين الطبيعة واحدة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها ؛ وأن لسرعة الضوء دائماً نفس القيمة . ومن هذه الفروض التي أيدتها التجارب العملية أمكننا استنتاج خواص القضبان والساعات المتحركة ، وتغير أطوالها ونظام توقيتها بالنسبة لسرعتها . وقد غيرت نظرية النسبية قوانين الميكانيكا . فالقوانين القديمة لا تتحقق إذا اقتربت سرعة الجسم المتحرك من سرعة الضوء . وقد أيدت التجربة القوانين الميكانيكية الجديدة لجسم متحرك كما صاغتها النظرية النسبية . وهناك نتيجة أخرى للنظرية الخاصة للنسبية وهي العلاقة بين الكتلة والطاقة . فالكتلة هي الطاقة والطاقة كتلة . ويتحدد قانونا بقاء المادة والطاقة في قانون واحد في النظرية النسبية هو قانون بقاء المادة والطاقة معا .

وتذهب النظرية العامة للنسبية إلى أبعد من ذلك في تحليل خواص عالم المكان والزمان . ولا تنحصر صحة هذه النظرية في المجموعات الإحداثية القاصرة فقط ، فهي تدرس مشكلة الجاذبية وتضع قوانين بنائية جديدة لمجال الجاذبية . وهي تدفعنا إلى تحليل الدور الذي تلعبه الهندسة في وصف العالم الطبيعي . وهي تعتبر تساوى كتلة الجاذبية مع الكتلة القاصرة شيئاً أساسياً وليس فقط مجرد صدفة ، كما كانت الحال في الميكانيكا الكلاسيكية . وتختلف النتائج العملية للنظرية العامة للنسبية اختلافاً بسيطاً فقط عن نتائج الميكانيكا الكلاسيكية ، وقد تأيدت هذه النتائج مما أمكننا الحصول عليه من النتائج العملية . ولكن قوة النظرية تكمن في بساطة فروضها وخلوها من التناقض .

وتؤكد نظرية النسبية أهمية فكرة المجال في علم الطبيعة . ولكننا لم ننجح بعد في صياغة علم الطبيعة بأكمله على صورة مجالية صرفة ، ولذا فإنه يجب علينا الآن أن نفرض وجود المجال والمادة على حد سواء .

الباب الرابع

الكلمات

[الاتصال وعدم الاتصال — الكلمات الأولية للمادة والكهرباء —
كلمات الضوء — طيف الضوء — موجات المادة — موجات الاحتمال —
علم الطبيعة والواقع] .

الاتصال وعدم الاتصال :

لنفرض أن أماننا خريطة لمدينة نيويورك وضواحيها ودعنا نتساءل عن أى
النقط على هذه الخريطة يمكن الوصول إليها بالقطار ؟ ولنسجل هذه النقط على
الخريطة بعد العثور عليها فى دليل القطارات . لنغير الآن سؤالنا إلى الصيغة : أى
النقط يمكننا الوصول إليها بالسيارة ؟ فإذا رسمنا خطوطاً على الخريطة تمثل كل
الطرق الممتدة من نيويورك فإننا يمكننا عملياً الوصول بالسيارة إلى أى نقطة على
هذه الطرق . وعندنا فى كلتا الحالتين مجموعتان من النقط ؛ فى الحالة الأولى نجد
أن النقط تنفصل عن بعضها وتعين محطات السكة الحديدية المختلفة وفى الحالة الثانية
نجدها تقع على كل النقط التى تمثل الطرق . وسيكون سؤالنا الثانى عن أبعاد كل
من هذه النقط عن نيويورك أو على الأدق عن نقطة محددة فى المدينة . وسيكون
لدينا فى الحالة الأولى بضعة أرقام متناسبة مع النقط المحددة على الخريطة . وسنرى
أن هذه الأرقام تتغير بغير انتظام ولكن على وثبات أو قفزات محدودة . ويمكننا
القول إذن بأن أبعاد الأماكن التى يمكن الوصول إليها بالقطار تتغير بطريقة غير
متصلة . أما فى حالة الأماكن التى يمكن الوصول إليها بالسيارة فإن هذه الأبعاد
تتغير بكميات يمكن تصغيرها كيفما نريد ، أى أن هذا التغير يمكن أن يحدث
بطريقة متصلة ، وأنه يمكن جعل التغير فى المسافة صغيراً فى حالة السيارة . ولكن
الحالة ليست كذلك فى حالة القطار .

وقد يحدث لانتاج منجم فحم أن يتغير تغيراً متصلاً لأن كمية الفحم الناتج في الإمكان زيادتها أو تقليلها بخطوات صغيرة . ولكن عدد عمال المنجم المستخدمين يتغير تغيراً غير متصل ، إذ أنه من اللغو أن نقول « ازداد عدد العمال منذ أمس بمقدار ٣٧٨٣ » . وإذا سئل رجل عن مقدار ما يحمل من النقود فإنه يمكنه الإجابة بعدد يحتوى على رقمين عشرين . ويمكن تغيير مبلغ من المال على قفزات فقط بطريق غير متصل . ففي أمريكا أصغر وحدة للعملة أو ما يمكننا تسميته الكم الأولى للعملة الأمريكية هو سنت واحد . والكم الأولى للعملة الإنجليزية هو الفاردينج وهو يساوى نصف قيمة الكم الأولى الأمريكي . فلدينا الآن إذن مثل لكمين أوليين يمكننا مقارنة قيمتهما . ونسبة قيمتهما لها معنى محدد إذ أن أحد الكمين يساوى ضعف قيمة الآخر .

ويمكن القول بأن بعض الكميات تتغير بطريقة متصلة وأخرى تتغير بطريقة غير متصلة ، على خطوات لا يمكن تصغيرها . وهذه الكميات غير القابلة للقسمة تسمى بالكمات الأولية للمقادير السابق ذكرها .

ويمكننا أن نزن كميات كبيرة من الرمال ونعتبرها متصلة رغم علمنا بتركيبها الحبيب . ولكن إذا أصبحت الرمال ذات قيمة عظيمة واستعملت موازين دقيقة لوزنها فإنه يتحتم علينا أن نعتبر أن الكتلة تتغير بمضاعفات لكمية ثابتة هي الحبة . وبذلك يصبح وزن تلك الحبة هو كمنا الأولى للكتلة . ونرى من هذا كيف أن خاصية التقطع أو الانفصال لكمية - كانت لا تزال تعتبر متصلة - يمكن تأكيدها بزيادة حساسية مقاييسنا .

وإذا كان علينا أن نصف الفكرة الأساسية لنظرية الكم في جملة واحدة لوجب علينا أن نقول : إن بعض الكميات الطبيعية التي كانت مازال تعتبر متصلة تتكون من كمات أولية .

ومدى الحقائق التي تشملها نظرية الكم فسيح جداً ، وقد اكتشفت هذه الحقائق بواسطة الأجهزة الدقيقة الصنع التي استخدمت في التجارب الحديثة . ومع أننا لن نستطيع وصف أو حتى مجرد الكلام عن التجارب الأساسية ، فإنه

لأمناس لنا من ذكر نتائج هذه التجارب حيث أن هدفنا هو شرح الآراء الأساسية الموجودة فقط .

الكهات الأولية الموجودة للمادة والكهرباء :

تنبئنا نظرية الحركة أن جميع العناصر تتكون من جزيئات . فإذا اعتبرنا أسهل الحالات ، باختيار أخف عنصر وهو الإيدروجين ، فإننا نعلم كيف أدت دراسة «الحركة البراونية» إلى تقدير كتلة جزيء واحد من الإيدروجين (صفحة ٤٧) ، وهى :
٣٣ و . جرام .

وهذا يدفعنا إلى أن نعتقد أن الكتلة غير متصلة حيث أن كتلة أى كمية من الإيدروجين يمكن أن تتغير فقط بعدد كامل من مقادير صغيرة كل منها يتناسب مع كتلة جزيء الإيدروجين . ولكن العمليات الكيميائية ترينا أن جزيء الإيدروجين يمكن تقسيمه إلى قسمين أو بعارة أخرى إن جزيء الإيدروجين يتكون من ذرتين . وفى العمليات الكيميائية تلعب الذرة - لا الجزيء - دور الكم الأولى . وبقسمة العدد السابق على اثنين ، نحصل على كتلة ذرة الإيدروجين وهى حوالى :

١٧ و . جرام .

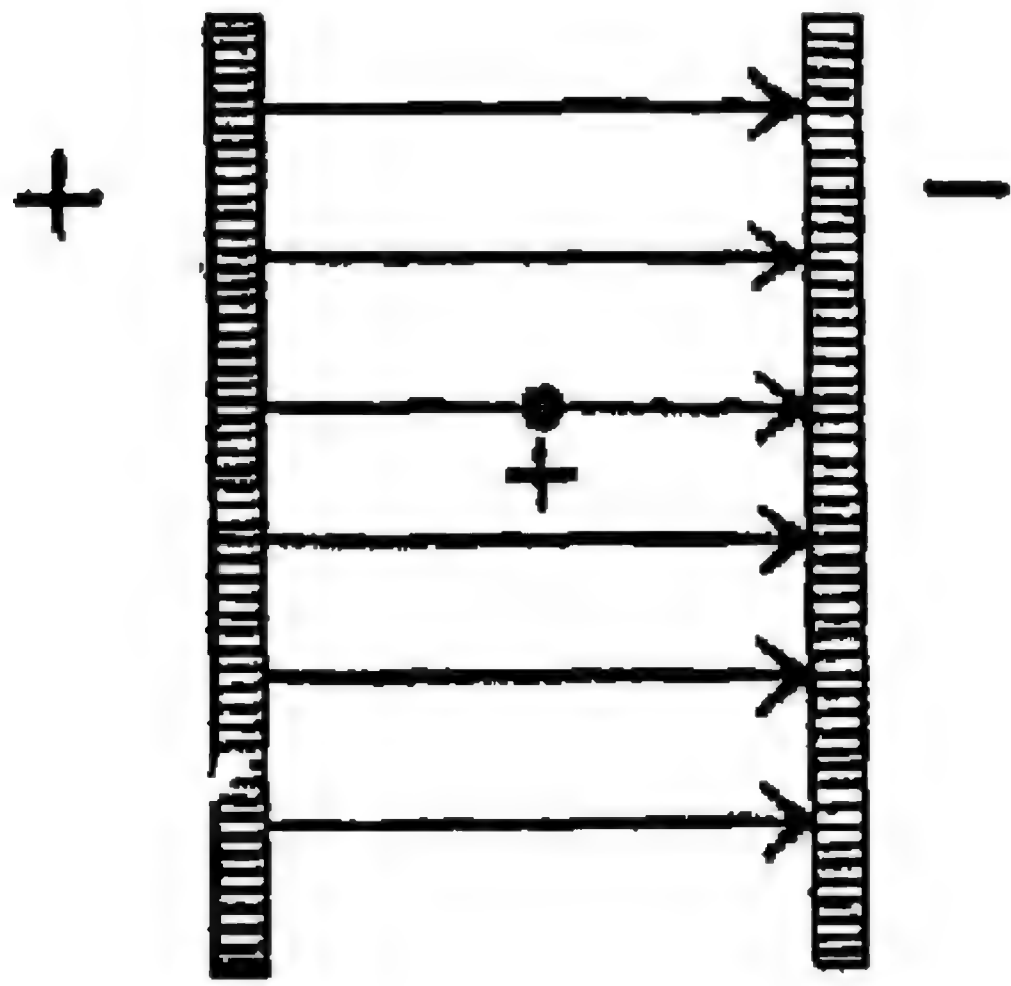
وإذن فالكتلة كمية غير متصلة ؛ ولكننا طبعاً لانعير هذه الحقيقة أى اهتمام عند تقدير الوزن . وحتى أدق المقاييس أبعد ماتكون عن الوصول إلى درجة الدقة اللازمة لاكتشاف عدم الاتصال فى تغير الكتلة .

لنعد الآن للتكلم عن حقيقة مألوفة . لنفرض أن لدينا سلكاً متصلاً بمصدر تيار كهربائى حيث يسير التيار خلاله من النقطة الأعلى إلى الأقل جهداً . ولعلنا نذكر أن كثيراً من الحقائق العملية قد أمكن تفسيرها بالنظرية البسيطة التى تفرض وجود مائع كهربائى يسير خلال السلك . ولعلنا نذكر أيضاً أن قرارنا (صفحة ٥٧) الخاص بالتساؤل عما إذا كان المائع الموجب يفيض من الجهد المرتفع إلى المنخفض أو أن المائع السالب يفيض من الجهد المنخفض إلى المرتفع كان مجرد اصطلاح . لنترك الآن جانباً كل ما طرأ من تغيير وتحسين كنتيجة لظهور

معتقدات المجال ونقبل جدلاً الصورة البسيطة الخاصة بفرض وجود المائع الكهربائي..
وحتى عند أخذنا بفكرة الموائع البسيطة فإتزال هناك بعض أسئلة تنتظر الجواب .
فكما نفهم من اللفظ « مائع » اعتبرت الكهربائية منذ فجر العلم كشيء له صفة
الاتصال ، وفي الاستطاعة طبقاً للصور القديمة تغيير كمية الشحنة بمقادير صغيرة
اختيارية ولكن لم يكن هناك داع لفرض كمات كهربائية أولية . ثم أدى نجاح
نظرية الحركة بعد ذلك إلى أن تتساءل هل توجد كمات أولية للموائع الكهربائية ؟
والسؤال الآخر الذي ما زال ينتظر الجواب هو هل يتكون التيار من فيضان المائع
الموجب أو السالب أو كليهما ؟

وللحصول على أجوبة لهذه الأسئلة لا بد من أن نطرد المائع الكهربائي من
السلك وندفعه إلى الحركة في الفضاء ، أى أن نستخلصه من برائن المادة ثم ندرس
خواصه التي يجب أن تظهر جلية حينئذ . وقد أجريت تجارب عديدة مثل هذه
في القرن التاسع عشر ، وقبل أن نشرح فكرة إحدى هذه التجارب العملية
سنذكر النتائج أولاً : يتميز المائع الكهربائي الذي يمر خلال السلك بشحنة
سالبة ، وإذن فهو يتجه من النقطة الأقل جهداً إلى الأعلى جهداً . ولو أننا كنا
قد توصلنا إلى هذه النتيجة في بادئ الأمر عند ما كانت نظرية الموائع الكهربائية
لا تزال في طور التكوين لغيرنا بلا شك مصطلحاتنا ، ولسمينا كهربائية القضيب
المطاط بالكهربائية الموجبة وكهربائية قضيب الزجاج بالسالبة ، وكان يصبح حينئذ
من الأوفق أن نعتبر المائع السالب موجباً . وعلينا الآن أن نتحمل تبعه هذا
الخطأ الناتج من عدم إصابة حدسنا . وسؤالنا الثاني المهم هو عما إذا كان تكوين
الكهربائية السالبة « محبباً » ، أى عما إذا كانت أو لم تكن مكونة من كمات
كهربائية ؟ وقد أثبتت بعض تجارب منفصلة بشكل لا يقبل الشك وجود هذه
الوحدة الأولية للكهرباء السالبة . وإذن يتكون المائع الكهربائي السالب من
حبيبات ، تماماً ، كما يتكون الشاطئ من حبيبات الرمال ، أو المنزل من اللبنة
وتم إثبات ذلك على يدى السير . ج . ج . تومسون منذ أكثر من خمسين عاماً .
وتسمى هذه الوحدات الأولية للكهرباء السالبة بالإلكترونات . وإذن تتكون

كل شحنة كهربائية سالبة من عدد كبير من تلك الشحنات الأولية المثلة بالالكترونات (أو الكهارب) . ويمكن للشحنة السالبة أن تتغير مثل الكتلة تغيراً غير متصل . وتبلغ الشحنة الكهربائية حداً من الصغر يجعلنا في كثير من الأحوال نعتبر الشحنات عموماً — وربما يكون ذلك من الأوفق — كميات متصلة ؛ وهكذا أدخلت نظريات الذرة والكهارب إلى العلوم فكرة الكميات الطبيعية غير المتصلة التي يمكن أن تتغير فقط على شكل دفعات .



لنتصور الآن لوحين معدنيين متوازيين موضوعين في مكان مفرغ من الهواء ، يحمل أحدهما شحنة موجبة والآخر شحنة سالبة . فإذا قربنا جسماً صغيراً موجب الشحنة من اللوحين ، فإنه ينجذب إلى اللوح السالب التكهرب ويطرد بعيداً

عن الآخر . وإذن تتجه خطوط القوى الكهربائية من اللوح السالب إلى اللوح الموجب التكهرب . وسيكون اتجاه القوة المؤثرة على جسم سالب التكهرب مضاداً للاتجاه السابق . وإذا كان اللوحان كبيرين بدرجة كافية فإن كثافة هذه الخطوط ستكون موزعة بانتظام بينهما في كل مكان ، ولن يهمنا أين نضع جسم الاختبار لأن القوة — وبالتالي كثافة هذه الخطوط — ستكون متماثلة . وإذا وجدت كهارب بين هذين اللوحين فإنها تتحرك مثل حركة القطر في مجال الأرض المغناطيسي ، أي أنها تتحرك موازية لبعضها متجهة من اللوح السالب إلى اللوح الموجب . وهناك طرق عملية كثيرة لدفع جمع من الالكترونات إلى مجال يوحد بين اتجاهاتهم . ومن أسهل هذه الطرق إحضار سلك مسخن بين لوحين مشحونين ، لأن خطوط قوى المجال الخارجى توجه الكهاب المنبعثة من السلك الساخن . وتبنى صمامات الراديو العادية على نفس هذه الفكرة .

وهناك تجارب رائعة عديدة سبق إجراؤها على سيال من الكهارب ، درست فيها وبحث بالتفصيل تغيرات اتجاهاتها في مختلف المجالات الكهربائية

والمغناطيسية الخارجية ، وأصبح في الإمكان أيضاً عزل كهرب واحد وتعيين شحنته الأولية ، وكتلته ، أى مقاومته الذاتية لفعل مجال خارجى . وسنذكر هنا فقط كتلة الالكترتون ، إذ قد ظهر أنها أصغر من ذرة الإيدروجين عشرين ألف مرة . وهكذا نرى أن كتلة ذرة الإيدروجين الصغيرة تظهر كبيرة بالنسبة لكتلة الكهرب . وتستلزم نظريات المجال الطبيعية أن تكون كتلة الكهرب أو بعبارته أخرى طاقته ناشئة عن طاقة مجاله نفسه ، الذى تبلغ شدته أقصاها داخل كرة صغيرة جداً ، وتصبح مهمة إذا بعدنا عن مركز الكهرب .

وقد سبق لنا أن ذكرنا أن ذرة أى عنصر ما هى إلا أصغر كتلة الأولية . وقد ظل العلماء مدة طويلة مؤمنين بهذا الرأى ، ولكنه الآن أصبح باطلاً ، فقد أظهر العلم نظريات حديثة أوضحت بطلان المعتقدات القديمة . ولا يوجد فى علم الطبيعة الآن من النظريات ما هو مبني على أسس متينة من الحقائق أكثر من تركيب الذرة المعقد . فقد تنبه العلماء أولاً إلى أن الكهرب وهو الكم الأولى للكهربائية السالبة ، هو أحد مكونات الذرة ، أى إحدى اللبئات الأولية التى تبنى منها جميع الأجسام . وقد ذكرنا مثال السلك الساخن وانبعاث الكهارب منه ، وليس هذا سوى مثال واحد من أمثلة عديدة لاستخلاص هذه الكهارب من المادة . وهذا المثال — الذى يوضح لنا ارتباط تركيب المادة بتركيب الكهرباء — ظهر على صورة لا تقبل الشك من حقائق عملية كثيرة جداً .

ومن السهل نسبياً استخلاص بعض الكهارب التى تدخل فى تركيب الذرة بالحرارة أو بطريقة أخرى كقذف الذرات بقذائف من كهارب أخرى خارجية . لنفرض أننا أدخلنا سلكاً معدنياً لدرجة الاحمرار فى جو من الإيدروجين المخلخل . ستنبعث الكهارب من السلك فى جميع الاتجاهات وتكتسب سرعاً بتأثير مجال كهربائى خارجى . وستزداد سرعة الكهرب تماماً كما يحدث لحجر ساقط فى مجال الجاذبية الأرضية . ويمكننا بهذه الطريقة الحصول على أشعة من الكهارب مندفعة بسرعة معينة فى اتجاه معين ، وقد أصبح الآن فى إمكاننا أن نجعل الكهارب تتحرك بسرعه تقترب من سرعة الضوء بتعريضها لتأثير مجال قوى جداً . ماذا يحدث إذن عند ما يسقط شعاع من الكهارب، ذات سرعة معينة ، على جزيئات الإيدروجين .

المخلخل ؟ لن يؤدي تصادم كهرب متحرك بسرعة فائقة مع جزيء الإيدروجين إلى انشطاره إلى ذرتين فقط ولكنه سيطرده كهرباً آخر من إحدى هاتين الذرتين .

دعنا نسلم بالحقيقة القائلة بأن الكهارب هي بعض مكونات المادة ، وإذن لن تصبح الذرة التي فقدت كهرباً واحداً بلا شحنة كهربائية كما كانت قبل أن تفقد الكهرباء . وذلك لأنها فقدت شحنة كهربائية أولية سالبة وإذن يجب أن يحمل ما بقي من الذرة شحنة موجبة . ولما كانت كتلة الكهرباء أصغر بكثير جداً من كتلة أخف الذرات فإننا نستطيع القول بأن معظم وزن الذرة ليس ممثلاً في الكهارب ولكن في الجسيمات الأولية الأخرى المتبقية والتي تفوق كتلتها بكثير كتلة الكهرباء ، والتي سنسميها بنواة الذرة .

وقد استحدث علم الطبيعة التجريبية الحديث طرقاً لتحطيم نواة الذرة وتغيير ذرات عنصر ما إلى ذرات عنصر آخر ولاستخلاص الجسيمات الأولية التي تتكون منها النواة ذاتها . وهذا الفصل من علم الطبيعة والمسمى « بطبيعة النواة » والذي قام فيه رذرفورد بدور كبير ، يعتبر شائعاً جداً من الناحية العملية . ولكننا مازلنا حتى الآن في حاجة إلى نظرية بسيطة في أسسها تربط بين الحقائق العملية في عالم الطبيعة التواوية . وبما أننا معنيون في هذه الصفحات فقط بدراسة المعتقدات الطبيعية العامة فإننا سنترك هذا الفصل رغباً عن أهميته الكبيرة في علم الطبيعة الحديث .

مكات الضوء :

إذا تصورنا حائطاً مقاماً على طول الشاطئ ، فإن أمواج البحر ستأخذ في مهاجمة الحائط ملحقه بسطحه بعض الليل ، ثم ما تلبث أن ترتد مفسحة الطريق لأفواج الأمواج القادمة التي ستواصل الهجوم على الحائط مزيلة جزءاً من المصيص الذي يكسى سطحه ، وبذلك يقل وزن الحائط ، ويمكننا أن نتساءل عن القدر الذي ستفقده الحائط في عام مثلاً . لتخيل الآن طريقة أخرى لإنقاص وزن الحائط بنفس القدر ، بأن نطلق الرصاص عليها محدثين بها ثقباً عديدة . سيقبل وزن الحائط بهذه الطريقة

كما قل في الحالة الأولى ؟ ولكن مظهر الحائط ينبئنا ما إذا كان النقص ناتجاً عن الفعل المستمر لأمواج البحر أم عن سيل الرصاص المتقطع . وسيكون من المفيد لكي نفهم ماستكلم عنه من الظواهر الطبيعية أن ندرك الفرق بين أمواج البحر وسيل الرصاص المنطلق .

سبق أن تكلمنا عن انطلاق الكهارب من السلك الساخن . وسنذكر هنا طريقة أخرى لاستخلاص الكهارب من المعدن بتسليط أشعة متجانسة مثل الأشعة البنفسجية — التي هي عبارة عن أشعة ذات طول موجي معين — على سطحه ، فتنبعث منه الكهارب بفعل تلك الأشعة التي تقتنصها من المعدن وتبعثها إلى الخارج أفواجاً متتالية متحركة بسرعة معينة . ويمكننا أن نقول من وجهة نظر قاعدة الطاقة ، أن طاقة الضوء تتحول جزئياً إلى طاقة حركة للكهارب المطرودة . ونستطيع بفضل التجارب العملية الحديثة معرفة هذه الرصاصات وتعيين سرعاتها وبالتالي طاقتها . ويسمى استخلاص الكهارب بالضوء الساقط على المعدن : الظاهرة الكهرضوئية .

وقد استخدمنا في التجربة السابقة أشعة ضوئية متجانسة ذات شدة معلومة ، ويجب علينا الآن — كما هي العادة في جميع التجارب العملية — أن نغير ظروف التجربة لترى ما إذا كان لهذا أثر في النتائج التي حصلنا عليها .

لنبدأ أولاً بتغيير شدة الضوء البنفسجي المتجانس الساقط على لوح معدني ولندرس الكيفية التي تتوقف بها طاقة الكهارب المنبعثة على شدة الضوء الساقط . لنحاول أيضاً أن نعثر على الإجابة عن طريق المنطق العلمي بدلاً من التجربة . يمكننا القول بأن قسماً من طاقة الإشعاع يتحول إلى طاقة حركة للكهارب في الظاهرة الكهرضوئية . فإذا أسقطنا على المعدن أشعة لها نفس طول الموجة ولكن من مصدر أقوى فإن طاقة الكهارب المنبعثة ستكون أكبر لأن الإشعاع سيكون أغنى بالطاقة . وإذن يكون من الطبيعي أن نتوقع ازدياد سرعة الكهارب المنبعثة بازدياد شدة الضوء . ولكن عند إجراء هذه التجربة عملياً

حصلنا — لدهشتنا — على نتيجة تتعارض مع استنتاجنا أيضاً . وهكذا نرى أن قوانين الطبيعة لا تسير وفق أهوائنا ، وقد وجدنا الآن تجربة حكمت على الأسس التي بنينا عليها نظريتنا بالفشل ، وكانت نتيجة هذه التجربة مدعاة لأشد العجب من وجهة نظر النظرية الموجية . إذ قد أظهرت أن الكهارب المنبعثة لها نفس السرعة (نفس الطاقة) التي لا تتأثر بزيادة شدة الضوء الساقط ، ولم يكن في الاستطاعة التنبؤ بهذه النتيجة على أساس النظرية الموجية . وهكذا نرى هنا أيضاً كيف يؤدي التعارض بين إحدى النظريات القديمة والتجربة إلى ظهور نظرية جديدة .

لنتعمد أن نكون ظالمين للنظرية الموجية غامطين لها أفضالها العظيمة ، فنتناس نصرها الشامل في شرح انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة جداً ، ولنحصر الآن اهتمامنا بالظاهرة الكهروضوئية ، ولنحاول إيجاد نظرية تضع لنا شرحاً مقبولاً لهذه الظاهرة . فمن المقطوع به أننا لا يمكننا أن نستنتج من النظرية الموجية عدم توقف طاقة الكهارب المطرودة من سطح المعدن على شدة الضوء الساقط . فلنبحث الآن عن نظرية أخرى . نرجع البصر مرة أخرى إلى نظرية الجسيمات لنيوتن التي نجحت في شرح كثير من ظواهر الضوء المألوفة وفشلت في شرح انثناء الأشعة الضوئية . وهي الظاهرة التي سنتعمد عدم ذكرها وتجاهل نجاح النظرية الموجية في هذا الشأن . وفي عهد نيوتن لم تكن حقيقة الطاقة قد وضحت بعد ، فكانت جسيمات الضوء في رأيه لا وزن لها ، ولكن عندما ظهرت نظريات الطاقة فيما بعد وأدرك الجميع أن للضوء طاقة يحملها معه لم يفكر أحد في تطبيق هذه المعتقدات على نظرية الجسيمات الضوئية . وبذلك ظلت نظرية نيوتن في عداد الأموات ولم يفكر أحد جدياً في بعثها إلى الحياة حتى أوائل قرننا الحالي .

ولكي نحفظ بالفكرة الأساسية في نظرية نيوتن يجب أن نفرض أن الضوء المتجانس مكون من حبيبات ضوئية ثم نستبدل بجسيمات الضوء القديمة كرات ضوئية سنطلق عليها اسم الفوتونات — وهي عبارة عن ذرات طاقة صغيرة تتحرك في الفضاء الخالي بسرعة الضوء . وإحياء نظرية نيوتن على هذه الصورة يؤدي بنا إلى

نظرية الكم للضوء ، فليست المادة والكهرباء فقط بل الطاقة الاشعاعية أيضاً ، تتميز جميعها بتركيب حبيبي ، أى أنها مركبة من كمات ضوئية وبذلك يصبح لدينا كمات طاقة فضلاً عن كمات المادة والكهرباء .

وقد كان بلانك أول من استحدث كمات الطاقة في مستهل القرن الحالى لكى يتمكن من شرح بعض ظواهر طبيعية أكثر تعقيداً من الظاهرة الكهرضوئية . ولكن الظاهرة الكهرضوئية توضح لنا بشكل قاطع وسهل ضرورة تغيير معتقداتنا القديمة .

ولا حاجة بنا لكى نقول أن نظرية الكم للضوء تفسر على الفور الظاهرة الكهرضوئية ، فعند ما يسقط سيل من الفوتونات على سطح معدنى فإن التفاعل بين الأشعة والمادة عبارة عن مجموعة كبيرة جداً من عمليات فردية ، يصطدم فيها الفوتون بالذرة فيقتطع منها كهرباً يقذف به إلى الخارج . وحيث أن جميع هذه العمليات الفردية متشابهة فإن جميع الكهارب المنبعثة سيكون لها نفس الطاقة في كل حالة . وليست زيادة شدة الضوء في هذه النظرية الجديدة سوى زيادة عدد الفوتونات الساقطة . وينتج عن ذلك طبعاً زيادة عدد الكهارب المنبعثة ولكن يحتفظ كل كهرب بنفس طاقته السابقة دون أن يعثرها أى تغيير . ويثبت لنا هذا أن النظرية الجديدة تتفق تماماً مع التجارب العملية .

ماذا يحدث عند ما تسقط أشعة متجانسة ذات لون آخر ، أحمر مثلاً ، بدلا من البنفسجى على سطح معدنى ؟ لنترك التجارب العملية تتولى الإجابة على هذا السؤال ، ويجب حينئذ أن نقيس طاقة الكهارب المنبعثة ونقارنها بطاقة الكهارب الناتجة من استخدام الضوء البنفسجى . وقد وجد بالتجربة أن طاقة الكهرب المنبعث بفعل الضوء الأحمر أقل من طاقة الكهرب المنبعث بفعل الضوء البنفسجى وهذا يدلنا على أن طاقة كمات الضوء تختلف باختلاف الألوان . فطاقة الفوتونات المكونة للون الأحمر تبلغ نصف طاقة تلك المكونة للون البنفسجى ، أو بعبارة أدق ، تقل طاقة الكمات الضوئية المكونة للون متجانس بازدياد أطوال موجات

الضوء . وهناك فرق أساسي بين كمات الطاقة وكمات الكهرباء ، إذ أن كمات الضوء تختلف باختلاف طول الموجة في حين أن كمات الكهرباء ثابتة لا تتغير . وإذا كان لا بد من استخدام أحد الأمثلة السابقة فيمكننا تشبيه كمات الضوء بأصغر وحدات العملة التي تختلف باختلاف كل دولة .

دعنا نستمر في تجاهل النظرية الموجبة للضوء ونفرض أن الضوء له تركيب حبيبي ، أى يتكون من كمات ضوئية — فوتونات — تتحرك في الفضاء بسرعة الضوء . وإذا أخذ الضوء صورة سيل من الفوتونات أو الكمات الأولية لطاقة الضوء ، وإذا نبذنا النظرية الموجية فإن فكرة الطول الموجي تختفى . ولكن ما الذى يحل محله ؟ هى طاقة كمات الضوء ! وبذلك يمكننا ترجمة العبارات التى تحتوى على مصطلحات النظرية الموجية إلى أخرى تستخدم فيها مصطلحات النظرية الكمية للإشعاع . مثلاً :

في لغة النظرية الموجية | في لغة النظرية الكمية

يتميز الضوء المتجانس بطول موجى معين ، فطول موجة الضوء الأحمر الموجود فى نهاية الطيف يبلغ ضعف طول موجة الضوء البنفسجى الموجود فى طرفه الآخر .	يحتوى الضوء المتجانس على فوتونات ذات طاقة معينة ، فطاقة الفوتون المكون للون نهاية الطيف الأحمر تبلغ نصف طاقة ذلك المكون لطرف الطيف البنفسجى .
--	---

ويمكننا تلخيص الموقف الحالى كما يلى : هناك من الظواهر الطبيعية ما يمكن شرحها بواسطة النظرية الموجية ، لا بواسطة نظرية الكم كظاهرة انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة . وهناك أيضاً بعض ظواهر أخرى مثل انتشار الضوء فى خطوط مستقيمة يمكن شرحها سواء بنظرية الكم أم بالنظرية الموجية .

ولكن ما هى حقيقة الضوء ؟ أهو موجات أم سيل من الفوتونات ؟ . وقد سبق أن وضعنا سؤالاً مماثلاً لهذا حينما تساءلنا : هل الضوء موجات أم سيل من

جسيمات ضوئية ؟ وكان لدينا حينئذ من الأسباب ما دفعنا إلى نبذ نظرية الجسيمات الضوئية وقبول النظرية الموجية التي شرحت جميع الظواهر الطبيعية . ولكن الموضوع هنا أكثر تعقيداً ، فليس لدينا من الدلائل ما يشير إلى إمكان شرح جميع الظواهر الطبيعية باختيار إحدى هاتين النظريتين . ويبدو لنا أنه لا مفر من استخدام إحدى هاتين النظريتين في حالات معينة والأخرى في حالات مختلفة ، واستخدام أى منها في حالات ثالثة . وهانحن نواجه صعوبة من نوع جديد . فلدينا صورتان طبيعيتان متعارضتان لا تكفى إحداها لشرح جميع الظواهر الضوئية ، ولكنهما معاً تنجحان في ذلك .

فكيف يمكننا أن نجتمع بين هاتين الصورتين ؟ كيف يمكننا فهم هذه الصورة المتعارضة عن طبيعة الضوء ؟ وليس من السهل حل هذه المعضلة ، وهانحن نواجه الآن مرة أخرى معضلة أساسية .

لنفرض الآن أننا نتبع نظرية الفوتونات ولنحاول بمساعدتها أن تفهم الحقائق التي تمكنت النظرية الموجية من شرحها . وبهذه الطريقة سنتكلم عن الصعاب التي تجعل النظريتين يبدوان لأول وهلة كأنهما متناقضتان .

ولعلنا ما زلنا نذكر أن شمعاً متجانساً من الضوء يمر خلال فتحة صغيرة في حجم رأس الدبوس يحدث على حاجز صغير حلقات مضيئة ومظلمة على التوالي (صفحة ٨٣) . كيف يمكننا شرح هذه الظاهرة على أساس نظرية الكم الضوئية ، تاركين النظرية الموجية جانباً ؟ لنفرض أن الفوتونات أخذت تمر من الثقب الصغير . فيمكننا توقع إضاءة الحاجز الموجود خلف الثقب إذا مررت الفوتونات خلاله أو إظلامه إذا لم تمر . ولكن بدلاً من ذلك فإننا نشاهد حلقات مضيئة وأخرى معتمة . ويمكننا أن نحاول شرحها كما يلي : يحتمل أن يكون هناك تفاعل ما بين حافة الثقب الصغير والفوتونات مما يتسبب عنه تكون حلقات الحيود . ويصعب علينا قبول هذه العبارة كشرح واف للغرض ، بل إنها - على أحسن الفروض - قد تصلح لكي تكون أساساً لنظرية مستقبلية لشرح الحيود بتفاعل بين المادة والفوتونات . وحتى هذا الأمل الضعيف تقضى عليه دراستنا السابقة لمثل عمل آخر . لنفرض

أن لدينا ثقبين صغيرين يمر خلالهما ضوء متجانس فيحدث خطوطاً مضيئة وأخرى معتممة على الحاجز الصغير الواقع خلف الثقبين . كيف نستطيع شرح هذه الظاهرة . على أساس نظرية الكم الضوئية ؟ يحتمل أن يمر فوتون من أحد الثقبين ، فإذا كان إحدى فوتونات الأشعة المتجانسة يمثل كما ضوئياً أولياً فإن من العسير علينا تصور انقسامه ومروره من كلا الثقبين . وحتى في هذه الحالة يجب أن تؤدي الظاهرة إلى تكوين حلقات مضيئة ومعتممة لا إلى خطوط مضيئة وأخرى مظلمة كما يحدث . فكيف أدى وجود الثقب الآخر إلى وجود هذه الظاهرة ؟ لعل الثقب الذي لم يمر الضوء خلاله قد أثر على الحلقات فجعلها خطوطاً !! إذا كان الفوتون شبيهاً بالجسيم المادي في الطبيعة الكلاسيكية فإنه يجب أن يمر خلال أحد الثقبين فقط . وفي هذه الحالة يشق علينا جداً فهم ظاهرة الحيود .

يضايرنا العلم دائماً إلى وضع آراء جديدة ونظريات حديثة لتخطى حواجز التناقضات التي تعترض طريق التقدم العلمي . وقد تولدت الأسس والآراء العلمية من التناحر بين الحقائق ومحاولاتنا لفهمها . وتجاهلنا الآن معضلة يلزم حلها وضع مبادئ جديدة . وقبل أن نذكر محاولات علم الطبيعة الحديث لشرح التناقض بين الصورتين الكمية والموجية للضوء ، سنبين أن هذه المعضلة تعترض طريقنا أيضاً عند دراستنا لكيات المادة بدلاً من كيات الضوء .

الطيف الضوئي :

نعلم مما سبق أن جميع المواد الموجودة في الطبيعة تتكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية . وقد كانت الكهارب أول ما اكتشف من هذه الجسيمات . ولكن الكهارب هي أيضاً الكيات الأولية للكهرباء السالبة . وقد سبق أن رأينا كيف تضطربنا بعض الظواهر الطبيعية إلى أن نفرض أن الضوء مكون من كيات ضوئية أولية تختلف باختلاف أطوال الموجات . ويجدر بنا قبل أن نستعرض في دراستنا أن نناقش بعض الظواهر التي تلعب فيها المادة والأشعاع دورين أساسيين .

يمكننا تحليل الأشعة الشمسية إلى مركباتها بواسطة منشور زجاجي ولذا يمكننا الحصول على طيف الشمس المستمر ، وسنحصل بذلك على كل أطوال الأمواج المحصورة بين طرفي الطيف المرئي . لنعتبر مثلاً آخر . سبق أن أشرنا إلى أن معدن الصوديوم المتوهج يبعث بإشعاعات متجانسة ، ذات لون واحد أو طول موجي واحد . فإذا وضعنا الصوديوم المتوهج أمام منشور زجاجي فإننا نرى خطاً واحداً ذا لون أصفر . وعلى العموم إذا وضعنا جسماً مشعاً أمام منشور فإن الضوء الصادر منه يتحلل إلى مركباته ميبناً خصائص طيف الجسم المشع .

ويؤدي مرور الكهرباء في أنبوبة مليئة بالغاز إلى تولد ضوء كالذي نشاهده منبعثاً من أنابيب النيون المستخدمة في الإعلانات المضيئة . لنضع مثل هذه الأنبوبة أمام المطياف الذي هو عبارة عن جهاز يقوم بعمل المنشور ولكنه أكثر حساسية وأعظم دقة فهو يرد الضوء إلى مركباته التي يتكون منها أى يحلله . فإذا نظرنا خلال المطياف إلى أشعة الشمس فإننا نشاهد طيفاً مستمراً تمثل فيه جميع الأطوال الموجية . أما إذا كان المصدر الضوئي ناشئاً عن مرور تيار كهربائي خلال غاز مخلخل فإن الطيف يصبح ذا خصائص مختلفة في هذه الحالة . فإننا نشاهد ، بدلاً من الطيف المستمر ذي الألوان العديدة الموجودة في طيف الشمس ، خطوطاً دقيقة مضيئة منفصلة عن بعضها بمناطق مظلمة . ويشير كل خط دقيق إلى لون معين أو إلى طول موجي معين بلغة النظرية الموجية . فإذا شاهدنا عشرين خطاً من خطوط الطيف مثلاً فإننا سنرمز لكل منها برقم يشير إلى طول موجته ، فبذلك تتميز أبخرة العناصر المختلفة بمجموعات مختلفة من الخطوط أى بمجموعات مختلفة من الأرقام التي ترمز لأطوال الأمواج المكونة للطيف الضوئي المشع . ولا يمكن أن يكون لعشرين نفس مجموعة الخطوط في طيفيهما المميزين ، كما أنه لا يمكن أن يكون لشخصين نفس بصمات الأصابع . وعندما أخذ علماء الطبيعة في اكتشاف هذه المجموعات الخطية لجميع العناصر أمكنهم اكتشاف وجود علاقات بين هذه الخطوط وأصبح بذلك في الإمكان الاستعاضة بمعادلة رياضية بسيطة عن أعمدة طويلة من الأرقام الدالة على أطوال موجات الطيف المختلفة .

ويمكننا نقل هذا الكلام إلى لغة الفوتونات . فهذه الخطوط تشير إلى أطوال موجات معينة أو بعبارة أخرى إلى فوتونات ذات طاقة محددة . وينتج من ذلك أن الغاز المتوهج لا يرسل فوتونات لها جميع قيم الطاقة الممكنة بل فقط تلك التي لها قيم تتميز نفس الغاز المتوهج . وهكذا نرى هنا أيضاً كيف تحد الحقائق من كثرة الاحتمالات الممكنة .

فذرات عنصر معين كالإيدروجين مثلاً تبعث فوتونات ذات طاقة معينة ، ويسمح لتلك الفوتونات ذات الطاقة المعينة بالإطلاق بينما يحال دون خروج الفوتونات الأخرى . ولنفرض — بقصد السهولة — أن عنصراً ما أرسل إشعاعات ذات خط طبق واحد أى فوتونات ذات طاقة معينة . وحيث أن الذرة تفقد جزءاً من طاقتها بالإشعاع فنستطيع بتطبيق قانون الطاقة أن نستنتج أن طاقة الذرة قبل الإشعاع كانت أعلا منها بعده وأن الفرق بين مستويي الطاقة هذين يجب أن يساوى طاقة الفوتون المنبعث . وإذن يمكننا التعبير عما نشاهده من انبعاث أشعة ذات طول موجي واحد أى فوتونات ذات طاقة معينة بالعبارة التالية : يوجد مستويًا طاقة فقط في كل ذرة من ذرات العنصر ويدلنا انبعاث فوتون من الذرة على انتقالها من مستوى الطاقة المرتفع إلى آخر منخفض .

ولكن يوجد عادة أكثر من خط واحد في أطياف العناصر ، وإذن تشير الفوتونات المنبعثة إلى وجود مستويات طاقة كثيرة لا واحداً فقط . أو بعبارة أخرى يمكننا أن نفرض أن لكل ذرة مستويات طاقة كثيرة وأن إشعاع فوتون يشير إلى انتقال الذرة من مستوى عال إلى آخر منخفض . ومن المهم أن نعلم أنه لا يمكن للذرة أن ترقى إلى كل مستوي للطاقة لأننا لا نجد أبداً فوتونات لها جميع قيم الطاقة ، أى أشعة لها جميع الأطوال الموجية في طيف أى عنصر — فبدلاً من أن نقول إن طيف كل ذرة يحوى خطوطاً معينة يمكننا القول بأن لكل ذرة مستويات طاقة معينة وأن انبعاث فوتونات الضوء مصحوب دائماً بانتقال الذرة من مستوى طاقة إلى آخر . وتكون مستويات الطاقة عادة منفصلة وغير متصلة . وهذا أيضاً يبين لنا كيف تحد الحقائق الطبيعية من كثرة الاحتمالات العلمية .

وقد كان العالم بوهر أول من علل في (١٩١٣) سبب ظهور بعض خطوط الطيف دون أخرى في أطيف العناصر . وقد رسمت نظريته التي وضعت منذ أكثر من أربعين عاماً ، صورة للذرة ، أمكننا بواسطتها — على الأقل في الحالات البسيطة — حساب أطيف العناصر . وبذا أصبحت تلك الأرقام التي كانت لا صلة بينها فجأة ترتبط ببعضها أشد ارتباط على ضوء نظرية بوهر .

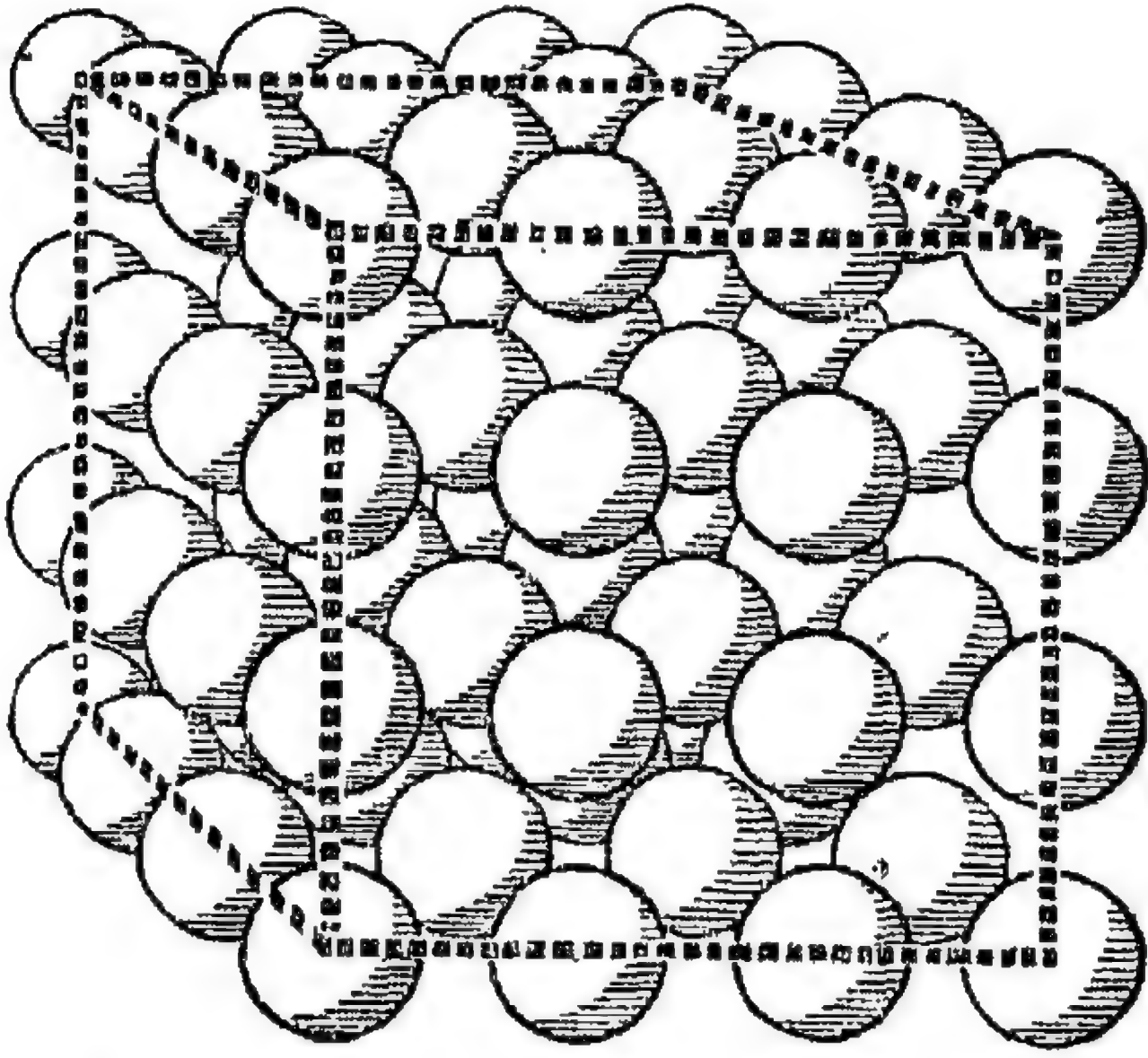
وقد كانت نظرية بوهر طريقاً مؤدياً إلى نظرية أكبر وأدق تسمى بالميكانيكا الموجية أو الكمية . وفرضنا في هذه الصفحات الأخيرة أن نتفرع لدراسة معتقدات هذه النظرية الأساسية . وقبل أن نبدأ ذلك يجب علينا أن نذكر نتيجة نظرية وأخرى عملية ذات طابع خاص .

يبدأ الطيف المرئي بطول موجي خاص للون البنفسجي ، وينتهي بطول موجي آخر للون الأحمر ، أو بعبارة أخرى إن طاقة الفوتونات في الطيف المرئي دائماً محصورة بين قيمتي طاقتي فوتونات اللونين البنفسجي والأحمر . ويرجع السبب في هذا التحديد طبعاً إلى تحديد قدرة العين الإنسانية . فإذا كان الفرق بين طاقتي مستويي طاقة في ذرة ما كبيراً جداً فإن الذرة تقذف خارجياً إحدى فوتونات الأشعة فوق البنفسجية وهذا يمثل بخط خارج الطيف المرئي . ولا يمكن إدراك هذا الخط بالعين المجردة بل بلوح فوتوغرافي مثلاً .

وتتكون أشعة إكس مثلاً من فوتونات ذات طاقة أكبر بكثير من فوتونات الطيف المرئي أو بعبارة أخرى تقل أطوال موجاتها آلاف المرات عن أطوال أمواج الضوء المرئي .

ولكن هل يمكننا عملياً قياس أطوال موجية بهذا القدر من الصغر ؟ لقد كان التوصل إلى ذلك غاية في الصعوبة في حالة الضوء العادي ، إذ كان علينا أن نعد عوايق صغيرة أو ثقوباً دقيقة لكي يمر خلالها الضوء . فالثقبان الدقيقان الذان كانا في حجم رأس الدبوس والذان استخدمنهما لتعيين حيود الضوء العادي يجب أن يزداد حجمهما صغراً ويقل بعدهما عن بعض ، إذا أردنا مشاهدة حيود الأشعة السينية .

كيف نستطيع إذن قياس أطوال موجات هذه الأشعة ؟ لقد ساعدتنا الطبيعة في حل هذه المعضلة . تتكون البلورة من مجموعة من الذرات تقع على مسافات صغيرة من بعضها ومرتبة ترتيباً خاصاً . يبين لنا الرسم المرفق مثلاً بسيطاً لتركيب البلورة . فبدلاً من الثقوب

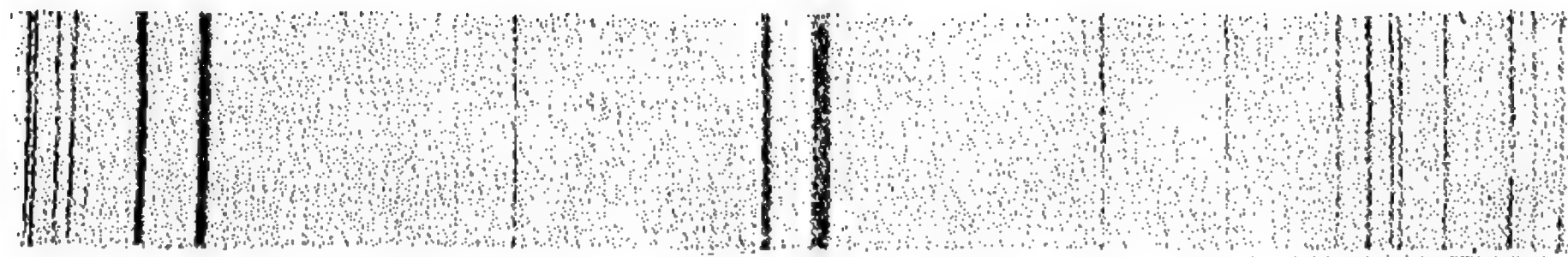


الدقيقة، تكون الذرات الموجودة في البلورة عوائق متناهية في الصغر مرتبة ترتيباً دقيقاً وتقع على مسافات صغيرة من بعضها البعض . وتبلغ المسافات بين الذرات ، حسب نظرية تركيب البلورات حداً من

الصغير يجعلنا نتوقع احتمال إحداثها لظاهرة الحيود للأشعة السينية . وقد أثبتت التجربة أن من الممكن حدوث ظاهرة الحيود لأمواج الأشعة السينية أثناء مرورها خلال هذه العوائق المتراسة في هذا الحجم الصغير أى حجم البلورة .

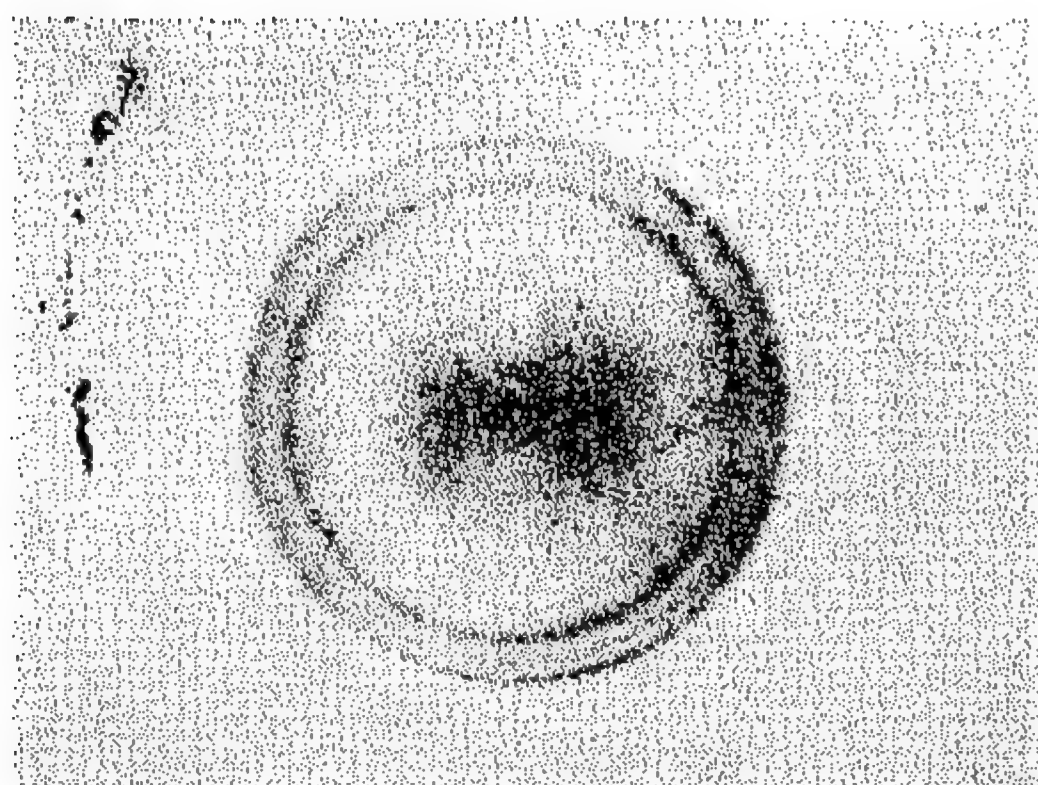
لنفرض أن شعاعاً من الأشعة السينية سقط على بلورة ثم بعد ذلك على لوح فوتوغرافي لكي نحصل على أنموذج لظاهرة الحيود . هناك طرق عديدة استخدمت في دراسة طيف الأشعة السينية واستنتاج أطوال موجاتها من أنموذج الحيود . ويقتضى منا ذكر ذلك كله بالتفصيل مجلدات بأسرها إذا رغبتنا في ذكر كل التفاصيل العملية والنظرية . وفي اللوحة «٣» نرى أنموذج الحيود الذي حصل عليه العلماء بإحدى هذه الطرق المختلفة . وهنا أيضاً نرى الحلقات المعتمة والمضيئة المميزة للنظرية الموجية . ونشاهد في المركز أثر الشعاع الذي لم يعان أى حيود والذي ما كنا نحصل على سواء في حالة عدم وجود البلورة بين مصدر الأشعة السينية واللوح الفوتوغرافي . ومن مثل هذه الألواح الفوتوغرافية يمكننا تقدير أطوال موجات الأشعة السينية ، وبالعكس إذا علمنا أطوال الموجات أصبح في استطاعتنا الحصول على معلومات عن تركيب البلورة .

اللوحة الثالثة



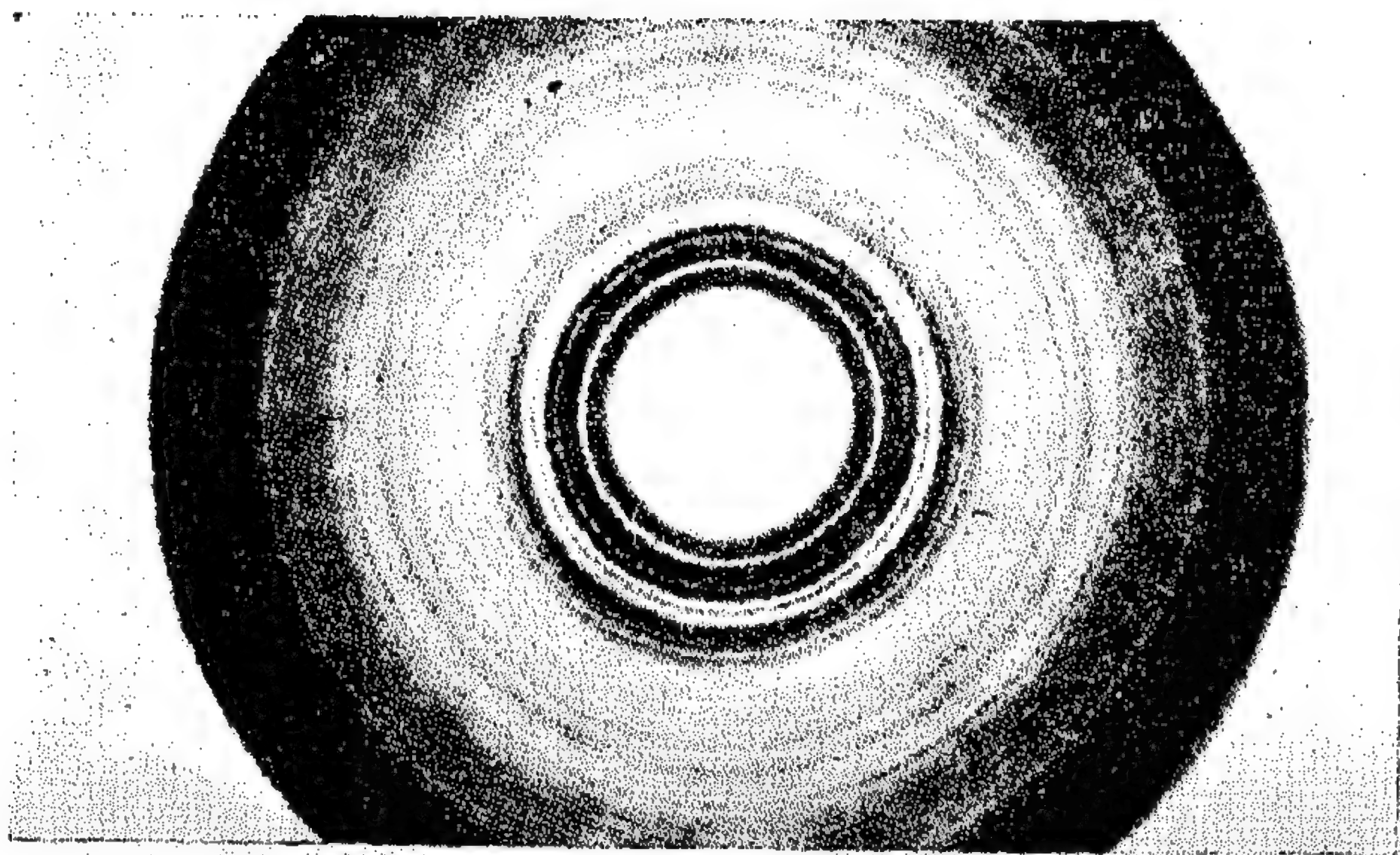
(أخذ الصورة أ. س. شاستون)

خطوط الطيف



(أخذ الصورة لاستوفيكى وجريجور)

حيود الأشعة السينية



(أخذ الصورة لوريا وكلينج)

حيود الموجات الكهربية

أمواج المادة :

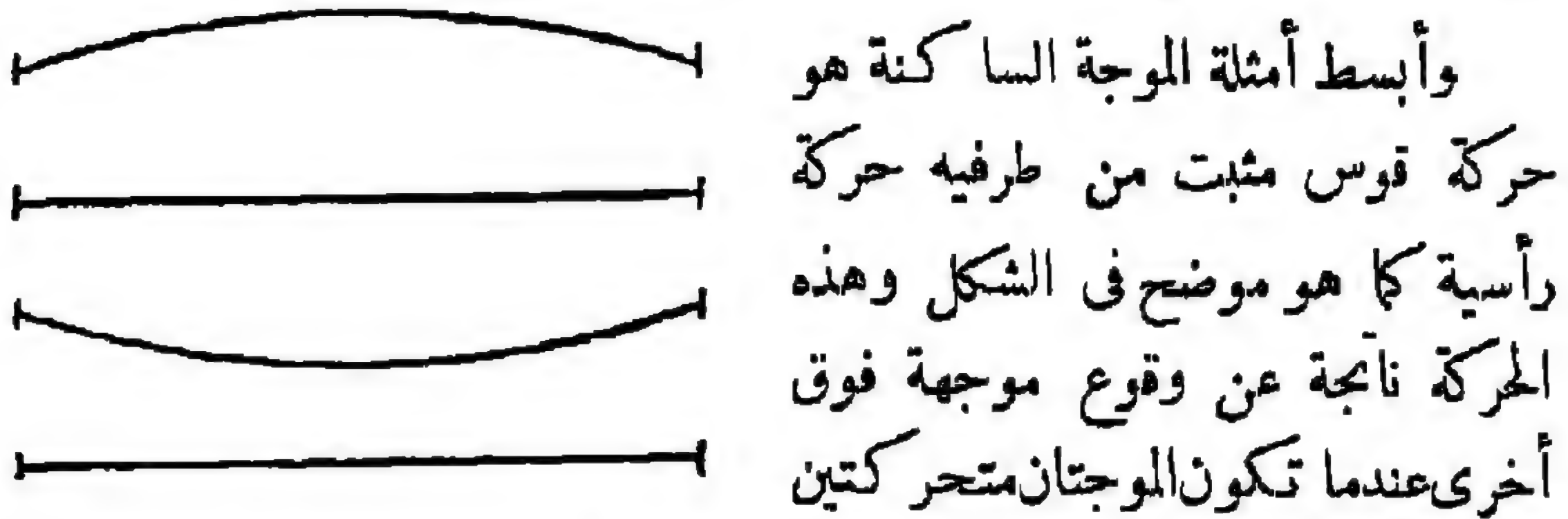
نرجع الآن إلى السؤال : كيف نستطيع فهم وجود بعض أطوال موجات مميزة في طيف كل عنصر ؟ ما أكثر ما نجد في علم الطبيعة أمثلة لما يحدث من تقدم أساسى نتيجة لدراسة مقارنات تعقد بين ظواهر لا يبدو أن بينها علاقة ما . وقد رأينا في هذه الصفحات كيف أن معتقدات وضعت وتطورت في أحد فروع العلم ثم طبقت في فرع آخر فحازت نجاحا كبيرا . ويعطينا تطور الآراء الميكانيكية والمجالية أمثلة كثيرة في هذا الصدد . ولعل ربط هذه الموضوعات المحلولة بغيرها التى لم تحل بعد يلتقى بعض الضوء على مصاعبنا ويوحى إلينا بآراء جديدة ! فمن السهل العثور على علاقة سطحية لا تغنى شيئا فى الحقيقة ولكن اكتشاف صفات أو علاقات أساسية مخفية تحت سطح من الاختلافات الظاهرية ثم استخدامها أساساً لنظرية ناجحة عمل جدى بلا شك غاية فى الأهمية . ونشوء ما نسميه بالميكانيكا الموجية وتطورها على أيدي دى بروجلي وشردينجر منذ أكثر من خمس وعشرين سنة خير مثل لبناء نظرية ناجحة ، على أساس مقارنة بارعة موفقة .



ولنبداً الآن بمثل كلاسيكى لعلاقة له بعلم الطبيعة الحديث . لنقبض بأحدى أيدينا على طرف أنبوبة طويلة جداً من المطاط أو سلك حلزوني طويل ونحاول تحريكه بانتظام حركة دورية إلى أعلا وإلى أسفل حتى يتذبذب طرفه . سنرى - كما سبق رؤيته ذلك فى أمثلة أخرى - نشوء موجة بسبب هذه الذبذبة وانتشارها خلال الأنبوبة بسرعة معينة . فإذا تصورنا أنبوبة ذات طول لا نهائى فإن أقسام الموجة المبتدئة ستواصل حركتها اللانهائية المستمرة بدون حدوث تداخل .

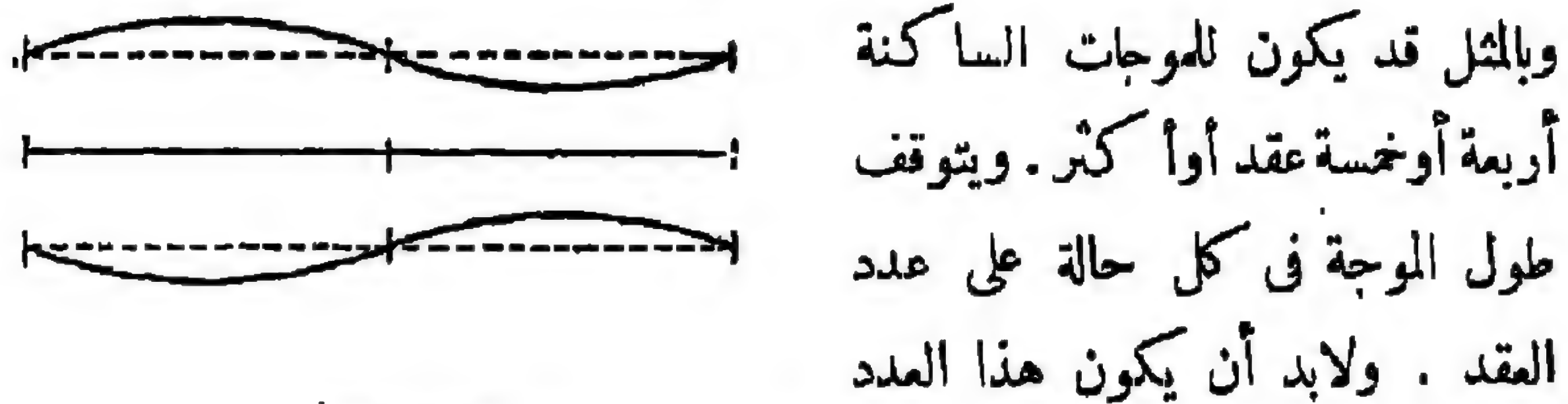
لنعتبر مثلاً آخر . لنثبت طرفى هذه الأنبوبة أو لعلله من الأفضل أن نعتبر قوس كمنجعة . ماذا يحدث الآن إذا ما تولدت موجة ما عند أحد طرفى أنبوبة المطاط أو القوس ؟ ستبدأ الموجة رحلتها كما فى المثال السابق ولكنها سرعان ما ترتد عند

الطرف الآخر للأنبوبة . وسيكون لدينا بذلك موجتان : إحداهما تولدت من حركة الذبذبة والأخرى بالانعكاس ، وسيتحركان في اتجاهين متضادين ويحدث بينهما تداخل . وليس من العسير علينا تتبع هذا التداخل واكتشاف الموجة الوحيدة الناتجة من تركيبهما مع بعضهما والتي نسميها بالموجة الساكنة ، ولعل الكلمتين « الموجة والساكنة » تظهران متناقضتين ، ولكن تركيب هاتين الموجتين مع بعضهما أدى إلى الجمع بين هاتين الكلمتين .



في اتجاهين متضادين . ومن مميزات هذه الحركة ثبوت طرفي السلك ، وتسمى نقطتا الطرفين بالعقدتين . ويمكننا القول بأن الموجة تسكن بين عقدتين بينما تواصل بقية السلك حركتها الرأسية .

ولكن هذه أبسط أنواع الموجة الساكنة ، فهناك أخرى ، إذ قد يكون للموجة الساكنة ثلاثة عقد ، اثنان في طرفي السلك والآخر في منتصفه . وتكون لدينا في هذه الحالة ثلاثة نقط ساكنة . وتكفي نظرة نلقها على الرسوم الموضحة هنا لترينا أن طول الموجة هنا يبلغ نصف طولها في المثال السابق ذي العقدتين .



صحیحاً وقد يتغير فقط على دفعات !

فعبارة مثل « عدد العقد في موجة ساكنة هو ٣٥٧٦ » مجرد هراء . وإذن يتغير طول الموجة تغيراً متقطعاً . أى أننا في هذا المثال الكلاسيكي قد وجدنا إحدى

خصائص نظرية الكم المألوفة . وترداد الموجة الساكنة التي يحدثها لاعب الكمان تعقيداً ، إذ أنها خليط من موجات عديدة لها ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ عقد ، أى خليط من أطوال موجية كثيرة . وفي استطاعة علم الطبيعة تحليل مثل هذا الخليط إلى مركبات من الأمواج الساكنة البسيطة التي يتكون منها . ويمكننا القول بلغة مصطلحاتنا السابقة أن الوتر المتذبذب له طيف ، تماماً كما يتميز كل عنصر بطيفه الإشعاعي . وكذلك أيضاً - كما كانت الحال في أطيف العناصر - لانشاهد في الوتر إلا ذبذبات معينة لا يسمح بوجود سواها .

هأنح قد اكتشفنا بعض أوجه شبه بين القوس المتذبذب والذرة المشعة . ومهما بدا من غرابة في هذا التشابه ، فسنستمر في دراستنا محاولين استنتاج ما نستطعه معه وسنمضي قدماً في المقارنة . تتكون ذرات كل عنصر من جسيمات أولية إحداها ثقيلة وتسمى بالنواة والأخرى خفيفة وهى الكهارب وتشبه هذه المجموعة آلة صوتية صغيرة تحدث فيها موجات ساكنة .

ومع ذلك فليست الموجة الساكنة سوى نتيجة لتداخل موجتين متحركتين أو أكثر ، فإذا كان في هذه المقارنة بعض الحقيقة فلا بد من وجود صورة أسهل من صورة الذرة لكي تمثل الموجة المنتشرة . فما هي ياترى أسهل تلك الصور ؟ لا يوجد في عالمنا المادى ما هو أسهل من الكهرب الذى لا تؤثر عليه أية قوى أو بعبارة أخرى الكهرب الساكن أو المتحرك حركة منتظمة . ولعلنا نسترسل في تشبيهنا فنمثل الكهرب المتحرك بانتظام بأمواج ذات طول معين . وهذه هى فكرة دى بروجلى الحديثة والجريئة في نفس الوقت .

وقد كان معروفاً قبل ذلك وجود ظواهر تتجلى منها الصفات الموجية للضوء . وأخرى تتضح منها الصفات الجسيمية . وبعد أن أخذنا بوجهة النظر الموجية ، وجدنا لدهشتنا أنه في بعض الحالات كحالة الظاهرة الكهروضوئية مثلاً - يسلك الضوء تماماً سلوك سيل من الفوتونات . أما في حالة الكهارب فخواصها عكس ذلك تماماً . إذ أننا اعتدنا تشبيه الكهارب بجسيمات هى الكبات الأولية للكهرباء والمادة . وقد درست شحنتها وكتلتها ، فإذا كان هناك شيء من الحقيقة

في فكرة دي بروجلي فإنه لا بد من وجود بعض ظواهر تتجلى فيها الخواص الموجية للمادة . وهذه النتيجة التي توصلنا إليها عن طريق المشابهة الصوتية تبدو غريبة يصعب تصديقها ، فكيف يمكن أن يكون لجسم متحرك أى صفات موجية ؟ ولكن ليست هذه أول مرة تقابل فيها معضلة من هذا النوع في علم الطبيعة ، فقد قابلنا نفس المعضلة في علم الظواهر الضوئية .

تقوم الآراء الأساسية بأهم دور في تكوين النظريات الطبيعية . وكتب علم الطبيعة مملأً بمعادلات رياضية معقدة . ولكن الآراء والأفكار — لا المعادلات — هي التي تؤدي إلى ظهور النظريات الطبيعية . ثم تأخذ الآراء والأفكار بعد ذلك الشكل الرياضي المحدد للنظرية ، بحيث يمكن مقارنة نتائجها بالتجربة . ويمكننا إيضاح ذلك بمثل المسألة التي نحن بصدد حلها الآن . فالفكرة الرئيسية هي أن الكهارب المنتظمة الحركة تسلك في بعض الظواهر المسلك الموجي . لنفرض أن لدينا كهرباً أو مجموعة من الكهارب — ذات سرعة واحدة — تتحرك بانتظام . ونحن نعلم قيم كتلة الكهرب وشحنته وسرعته ، فإذا أردنا إلحاق الصفة الموجية للكهرب المنتظم الحركة بكيفية ما ، فإن سؤالنا التالي هو : ما هو طول الموجة ؟ ويتطلب هذا السؤال وضع نظرية تمكننا من تقدير قيمة هذا الطول الموجي الملحق بالكهرب . وهذه مسألة بسيطة ، والسهولة الرياضية لعمل دي بروجلي عند إجابته على هذا السؤال تدعو حقاً إلى الإعجاب . ففي الوقت الذي وضعت فيه هذه النظرية كانت النظريات الطبيعية الأخرى مليئة بالرياضيات الغامضة والمعقدة ؛ أما رياضة الأمواج الملحقة بالمادة فهي غاية في البساطة ، في حين أن الفكرة الأساسية آية في عمق التفكير . وقد رأينا في حالة الأمواج الضوئية والفوتونات أنه يمكننا نقل أى عبارة صيغت بلغة الأمواج إلى لغة الفوتونات أو جسيمات الضوء . سنطبق نفس الشيء على الأمواج الكهربائية . ولغة الجسيمات مألوفة لنا في حالة الكهارب المنتظمة الحركة ويمكننا نقل كل عبارة صيغت بلغة الجسيمات إلى اللغة الموجية تماماً كما في حالة الفوتونات . وقد سهل لنا مهمة هذه الترجمة عاملان : أولهما هو التشابه بين أمواج الضوء وأمواج الكهرب أو بين الفوتونات والكهارب . وسنحاول

استخدام نفس طريقة الترجمة للمادة كما استخدمناها للضوء . وقد أمدتنا نظرية النسبية الخاصة بالدليل الآخر ، فقوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز لا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . ويمكننا تعيين طول الموجة الملتصقة بكهرب متحرك تماماً بواسطة هذين العاملين . فينتج من ذلك أن كهرباً متحركاً بسرعة ١٠٠٠٠ ميلاً في الثانية مثلاً له طول موجي ، من السهل تقدير قيمته وقد وجد أنه يقرب من أطوال موجات الأشعة السينية . وإذن نستنتج من ذلك أنه إذا كان إدراك الخواص الموجية للمادة ممكناً فإنه يجب إجراء تجارب مماثلة لتلك التي أجريت على الأشعة السينية .

لنعتبر حزمة أو شعاعاً من الكهارب تتحرك بانتظام بسرعة معينة أي موجة كهربية متجانسة ، إذا استخدمنا المصطلحات الموجية ؛ ولنفرض أنها تسقط على بللورة رقيقة جداً تمثل دور محزوز الحيود . وتبلغ المسافات بين العوائق المسببة للحيود في البللورة — أي بين الذرات — حداً كبيراً من الصفر يكفي لإحداث الحيود للأشعة السينية . فلملنا نتوقع ظاهرة مشابهة لتلك عند استعمال الموجات الكهربية ذات الطول الموجي القريب من الأشعة السينية . ويمكن تسجيل حيود هذه الموجات الكهربية عند مرورها خلال الطبقة الرقيقة من البلورات الموجودة في لوح فوتوغرافي . وفي الحقيقة تظهر هذه التجربة ما يمكننا اعتباره بلاشك نصراً رائعاً للنظرية ، ألا وهو ظاهرة حيود الموجات الكهربية . والتشابه بين حيود الموجات الكهربية والأشعة السينية ملفت للنظر كما يرى من مقارنة النماذج في اللوحة (٣) . وتمكننا مثل هذه الصور من تقدير أطوال موجات الأشعة السينية . وينطبق نفس الكلام على الموجات الكهربية ، فيعطينا أنموذج الحيود طول الموجة المادية مع التأييد العملي التام للنظرية وفي هذا تأييد شامل لاستنتاجاتنا .

ومع ذلك فهذه النتيجة تزيد في متاعبنا ! كما يتضح من الحالة المشابهة لذلك في حالة أمواج الضوء التي سبق ذكرها . فإذا سلط كهرب على ثقب دقيق جداً فإنه سيحيد عن طريقه تماماً كما تفعل موجة ضوئية ، وسنشاهد على اللوح الفوتوغرافي

حلقات مضيئة ومظلمة . ربما كان هناك بعض الأمل في شرح هذه الظاهرة أيضاً بتفاعل بين الكهرباء وحافة الجسم المعترض على الرغم من أن مثل هذا الشرح بعيد الاحتمال . ولكن ماذا عن ثقبى الدبوس المتجاورين ؟ ستظهر خطوط بدلاً من الحلقات . كيف يمكن أن يكون وجود الثقب الآخر سبباً في إحداث هذا التغير ؟ فالكهرب لا يمكن شطره وليس له إلا أن يمر خلال أحد الثقبين . كيف يمكن للكهرب أن يعلم أثناء مروره خلال أحد الثقبين أن هناك ثقباً آخر قريباً منه ؟

وقد سبق أن تساءلنا عن ماهية الضوء ؟ أهو سيل من الجسيمات أم موجة ؟ ويحق لنا الآن أن نسأل ماهى المادة وما هو الكهرباء ؟ هل هو جسيم أم موجة ؟ فالكهرب له خواص الجسيم عند ما يتحرك في مجال كهربائى أو مغناطيسى خارجى وله الخواص الموجية عند ما يحيد أثناء مروره خلال بلورة . وقد قابلنا عند دراستنا لكلمات المادة الأولية نفس الصعاب التى لاقيناها أثناء دراستنا لكلمات الضوء . وبذلك ينشأ الآن السؤال التالى وهو من أهم الأسئلة التى أثارها التطور العلمى الحديث : كيف نجمع بين الرأيين المتعارضين عن المادة والأمواج ، وهذه المعضلة هى من ذلك النوع الذى يودى حلها إلى تقدم علمى لا شك فيه . وقد حاول علم الطبيعة الحديث حل هذه المشكلة ؛ والأمرا الآن متروك للمستقبل الذى يقرر ما إذا كان هذا الحل الذى اقترحه علم الطبيعة الحديث دائماً أم مؤقتاً فقط !

١. أمواج الاحتمال :

إذا علمنا موضع نقطة مادية وسرعتها والقوى الخارجية المؤثرة عليها فإننا نستطيع — طبقاً لقواعد الميكانيكا الكلاسيكية — التنبؤ بحركة النقطة المستقبلية بواسطة استخدام القوانين الميكانيكية . والمباراة « للنقطة المادية السرعة كذا عند انوضع كذا فى لحظة ما » لها معنى محدد فى الميكانيكا الكلاسيكية .

وقد حاول العلماء — فى أوائل القرن التاسع عشر — شرح جميع ظواهر علم الطبيعة على أساس الفرض بوجود قوى بسيطة تؤثر على جسيمات مادية ذات

مواضع معينة وسرع معينة عند لحظة ما . لنحاول تذكر كيف وصفنا الحركة عند ما تكلمنا عن الميكانيكا عند بدء استعراضنا لظواهر علم الطبيعة الحديث . فقد رسمنا نقاطاً على مسار معين كي تحدد لنا أوضاع الجسم عند لحظات معينة ، وكذلك مماسات متجهة كي توضح لنا مقادير واتجاهات السرعة . وقد كان هذا كله بسيطاً وسهل الفهم . ولكننا لا نستطيع تطبيق ذلك كله على كمات المادة الأولية (أى الكهارب) أو على كمات الطاقة الأولية (أى الفوتونات) حيث أنه ليس في الإمكان تمثيل حركة فوتون أو كهرب بالطريقة التي تخيلنا بها الحركة في الميكانيكا الكلاسيكية ، وليس مثال ثقبى الدبوس عنا بعيد . ويبدو لنا أن كلا من الفوتون أو الكهرب يمر خلال الثقبين معاً في نفس الوقت . وبذلك يصبح من المستحيل شرح هذه الظاهرة باعتبار مسار الفوتون أو الكهرب طبقاً للنظرية الكلاسيكية القديمة . وبديهي أنه يجب علينا التسليم بوجود حركات أولية مثل مرور الكهارب والفوتونات خلال الثقوب . وليس هناك شك في وجود الكمات الأولية للعادة والطاقة ولكن من المؤكد أيضاً أننا لا نستطيع وضع القوانين الأولية على أساس تحديد الأماكن والسرع عند لحظة ما بطريقة الميكانيكا الكلاسيكية السهلة .

لنحاول الآن تجربة أخرى بأن نكرر هذه الحوادث الأولية كأن نرسل الكهارب الواحد تلو الآخر في اتجاه ثقبى الدبوس الصغيرين . وسيكون استخدام الكلمة « كهرب » على سبيل التحديد فقط في هذه الحالة ، وينطبق نفس الكلام على الفوتونات .

لنفرض أننا أعدنا هذه التجربة مراراً عديدة بنفس الطريقة أى أن الكهارب تتحرك في اتجاه ثقبى الدبوس بنفس السرعة الواحد تلو الآخر . وغنى عن الذكر أن هذه التجربة مثالية أى أننا لا يمكننا القيام بها عملياً ولكننا نستطيع تخيلها فقط إذ أنه ليس في الإمكان إطلاق الكهارب والفوتونات فرادى كما ينطلق الرصاص من البندقية .

ومن الطبيعي أن يؤدي تكرار هذه التجارب إلى الحصول على حلقات

مظلمة وأخرى مضيئة إذا كان لدينا ثقباً واحداً وعلى خطوط مضيئة ومعتمة إذا كان لدينا ثقبان . ولكن هناك فرق أساسي ، وذلك أنه في حالة الكهرب الواحد كان من العسير علينا تصور نتيجة التجربة في حين أنه سهل فهمها إذا تكررت العملية مراراً ، حيث يمكننا أن نقول الآن : تظهر الخطوط المضيئة عند ما تسقط على أماكنها كهارب كثيرة . أما في الخطوط المظلمة فيقل عدد الكهارب الساقطة كثيراً ، وينعدم سقوط الكهارب في المنطقة ذات الظلام الكامل . وبديهي أننا لا نستطيع أن نفرض أن جميع الكهارب تمر خلال أحد الثقبين فقط لأنه إذا كان ذلك صحيحاً فإن تغطية الثقب الآخر يجب ألا تسبب أى فرق ، ولكننا نعلم أن تغطية الثقب الثاني يغير فعلاً في نتيجة التجربة . وحيث أن الكهرب غير قابل للانشطار فإننا لا نستطيع تصور مروره من كلا الثقبين في نفس الوقت . فإذا نريد لنا تكرار التجربة مخرجاً من هذا المأزق ، إذ نستطيع القول بأن بعض الكهارب تمر من أحد الثقبين وتنفذ البقية من الثقب الآخر . ولا يمكننا معرفة سبب تفضيل الكهارب لثقوب خاصة ، ولكن يجب أن تكون نتيجة تكرار التجربة اقتسام الثقبين للكهارب الساقطة من المصدر والمتجهة إلى الحاجز الذي تتكون عليه نماذج الحيود . فإذا ذكرنا فقط ما يحدث للكهارب عند إعادة التجربة ، غير عابئين بسلوك الكهارب الفردية فإن شرح الفرق بين دوائر الحيود وخطوطه يصبح يسيراً . وهكذا أدت دراسة سلسلة من التجارب إلى نشوء فكرة «مجموعة» أو «جمع» من الجسيمات التي لا نستطيع التنبؤ بخواصها الفردية . فلا يمكننا مثلاً أن تنبأ بمسار كهرب فردى ، ولكننا نستطيع أن تنبأ بنتيجة حركة المجموعة كلها ألا وهي حدوث خطوط مضيئة ومظلمة على الحاجز .

لنترك علم الطبيعة الكمي جانباً الآن بعض الوقت . لعلنا نذكر أننا إذا علمنا مكان وسرعة نقطة عادية عند لحظة ما والقوى المؤثرة عليها في علم الطبيعة الكلاسيكي فإننا نستطيع التنبؤ بحركة النقطة المستقبلية . وقد رأينا بعد ذلك كيف طابقت وجهة النظر الميكانيكية على نظرية الحركة للمادة ، وكيف أدت دراستنا لهذه النظرية إلى نشوء فكرة ستكون ذات فائدة كبيرة لنا فيما بعد إذا فهمناها حق الفهم .

لنفرض أن لدينا وعاء به غاز . إذا أردنا تتبع حركة كل جسيم فإن علينا أن نبدأ بإيجاد الظروف الابتدائية أى الأوضاع والسرع الابتدائية لجميع الجسيمات . وحتى إذا فرضنا إمكان ذلك فإن تسجيل النتيجة على الورق تستغرق وقتاً أطول من حياة الإنسان نظراً لضخامة عدد الجسيمات التى علينا أن نعتبرها . وإذا رغبتنا بعد ذلك فى استخدام طرق الميكانيكا الكلاسيكية لحساب الأوضاع النهائية للجسيمات فإننا نقابل صعاباً لا يمكننا التغلب عليها . فمن المسلم به مبدئياً أننا نستطيع استخدام الطريقة المتبعة فى دراسة حركة النجوم ولكننا لا نستطيع القيام بها عملياً ، وإذن لا مفر من أن نلجأ إلى الطريقة الإحصائية . وليست هذه الطريقة فى حاجة إلى المعرفة التامة للأحوال الابتدائية ، وبذلك تقل معلوماتنا عن أية مجموعة من جسيمات الغاز عند لحظة ما ويتبع ذلك ضعف قدرتنا على معرفة الأحوال الماضية والمستقبلية للمجموعة . ولن نهتم بمصير كل جسيم على حدة بل ستصبح مسألتنا الآن ذات طبيعة خاصة . فمثلاً لن نسأل « ماهى سرعة كل جسيم عند هذه اللحظة » ولكن ربما نسأل « كم عدد الجسيمات التى تنحصر سرعتها بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدماً فى الثانية » . أى أننا لن نهتم أبداً بالأفراد ولكننا سنحاول فقط تعيين الخواص العامة للمجموعة كلها كوحدة . ومن البديهي أن الطريقة الإحصائية لن تصح إلا إذا احتوت المجموعة على عدد كبير جداً من الأفراد .

ولا يمكننا معرفة سلوك فرد داخل مجموعة ما عند استخدام الطريقة الإحصائية بل يمكننا فقط أن نتكلم عن احتمال سلوكها بطريقة معينة . فإذا أخبرتنا القوانين الإحصائية بأن ثلث الجسيمات لها سرعة بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدماً فى الثانية فإن هذا يعنى أنه بتكرار عملية القياس على جسيمات كثيرة نحصل على هذا المعدل حقيقة أو بعبارة أخرى أن احتمال وجود جسيم له هذا القدر من السرعة هو $\frac{1}{3}$.

وبالمثل لكى نقدر معدل التكاثر فى مجتمع كبير ، لا يكفي أن نعلم أن أسرة ما قد رزقت بطفل ، إذ أن ما يهمنا هو معرفة نتيجة إحصائية ليس للأفراد فيها دور خاص .

وإذا حاولنا تسجيل أرقام عدد كبير من السيارات فإننا سرعان ما نكتشف أن ثلث هذه الأرقام تقبل القسمة على ثلاثة . ولكننا لا يمكننا أن نجزم بأن السيارة التي ستمر بنا بعد لحظة ستحمل رقماً له هذه الخاصية . فالقوانين الإحصائية يمكن تطبيقها على مجموعات كبيرة فقط ، ولكنها لا تنطبق على أعضاء تلك المجموعة كلها على أفراد .

ويمكننا الآن العودة إلى موضوعنا الكمي . تتميز قوانين علم الطبيعة الكمي بطابع إحصائي أي أنها لا تخص فرداً واحداً بذاته بل مجموعة أفراد متجانسة ، ولا يمكن تحقيق هذه القوانين بإجراء قياس على فرد واحد بل فقط بسلسلة من تجارب متكررة .

ويحاول علم الطبيعة الكمي مثلاً صياغة قوانين خاصة بالتفكك الإشعاعي لتتحكم في التحولات الذاتية من عنصر إلى آخر . فالمعلوم مثلاً أنه في ١٦٠٠ عام يتفكك نصف جرام من الراديوم ويتبقى النصف الآخر . ويمكننا معرفة عدد الذرات التي ستتفكك في نصف الساعة القادمة ، ولكننا في نفس الوقت لا نستطيع أن نقول لماذا يقضي على هذه الذرات ذاتها دون الأخرى . وليس في استطاعتنا — حسب معلوماتنا الحالية — تعيين الذرة المقضى عليها بالتفكك ، ولا يتوقف مصرع الذرة على عمرها ، ولا يوجد قانون يختص بدراسة سلوك الذرة الفردي وأحوالها الخاصة ، ولكننا نستطيع فقط صياغة قوانين إحصائية تتحكم في مجموعات من الذرات .

لنعتبر مثلاً آخر . إذا وضع غاز مضيء لمادة ما أمام المطياف ، فإننا نشاهد خطوطاً ذات أطوال موجية معينة . ويعتبر ظهور مجموعة متقطعة ذات أطوال موجية معينة من خواص الظواهر الطبيعية التي اكتشفنا فيها وجود الكمات الأولية . ولكن هناك ناحية أخرى للموضوع فهناك خطوط زاهية وأخرى باهتة ، ويستلزم الخلط الزاهي إشعاع عدد كبير من الفوتونات التابعة لهذا الطول الموجي المعين ، ويعني الخط الباهت إشعاع عدد ضئيل نسبياً من الفوتونات الملحقة بهذا الطول الموجي . وهنا تعطينا النظرية أيضاً شروحاً لها طابع إحصائي فقط .

ويشير كل خط إلى انتقال من مستوى طاقة عال إلى آخر منخفض . وتجبرنا النظرية عن احتمال حدوث كل من هذه الانتقالات الممكنة ، ولكنها لا تنبئنا شيئاً عن انتقال ذرة فردية بذاتها ؛ وقد أصابت النظرية نجاحاً كبيراً لأن جميع هذه الظواهر تتضمن جموعاً كبيرة لأفراداً . ويظهر أن علم الطبيعة الكمي الحديث يشبه نظرية الحركة للمادة بعض الشيء حيث أن لكليهما طابع إحصائي ويشير كل منهما إلى جموع كبيرة . ولن تهملنا نقط التشابه في هذه المقارنة فقط بل نقط الاختلاف أيضاً . وينحصر معظم التشابه بين نظرية الحركة للمادة والطبيعة الكمية في الطابع الإحصائي لكل منهما ، ولكن ماهي أوجه الاختلاف ؟

إذا رغبتنا في معرفة الرجال والنساء الذين تزيد أعمارهم عن ٢٥ عاماً في مدينة ما فإننا يجب علينا أن نطلب إلى كل مواطن أن يملأ في استمارة خاصة البيانات التي تقع تحت العناوين « ذكر » ، « أنثى » ، « العمر » . وبفرض صحة كل إجابة فإننا سنحصل — بعد عد وتقسيم بيانات الاستثمارات — على نتيجة ذات طابع إحصائي ، حيث أن أسماء الأشخاص وعناوينهم لا تهملنا في شيء . وقد تولد الطابع الإحصائي من معرفة الحالات الفردية . وكذلك الحال في نظرية الحركة للمادة إذ توجد لدينا قوانين إحصائية تتحكم في المجموعات وبنيت على أساس الحالات الفردية .

ولكن الوضع يختلف تماماً الاختلاف في علم الطبيعة الكمي ، إذ تنتج هذه القوانين الإحصائية فوراً دون اعتبار أي وجود للحالات الفردية . وقد رأينا في مثال الفوتون أو الكهرّب وثقبي الدبوس أننا لا نستطيع وصف الحركة الممكنة للجسيمات الأولية في المكان والزمان كما فعلنا في علم الطبيعة الكلاسيكي ، أي أن علم الطبيعة الكمي يلغى وجود القوانين الفردية للجسيمات الأولية ويذكر لنا مباشرة القوانين التي تتحكم في الجموع . ويستحيل علينا — على أساس الطبيعة الكمية — وصف مكان وسرعة جسم أولى أو التنبؤ بحركته المستقبلية كما هي الحال في الطبيعة الكلاسيكية . وتهتم الطبيعة الكمية فقط بالجموع وتنطبق قوانينها عليها لا على الأفراد . وإن الحاجة الملحة — وليست الرغبة في التجديد — هي

التي دفعتنا إلى تغيير وجهة النظر الكلاسيكية . وقد سبق لنا إيضاح متاعب تطبيق وجهة النظر القديمة في مثال ظاهرة الحيود ، وهناك أمثلة أخرى عديدة مشابهة يمكننا ذكرها . وتدفعنا محاولاتنا لفهم الحقائق الطبيعية إلى تغيير وجهات نظرنا باستمرار . والأمر متروك للمستقبل لكي يحكم ما إذا كنا قد سلكنا الطريق الصواب الوحيد أو إذا كان هناك حل لمتاعبنا خير من هذا الحل الذي وجدناه .

وقد كان علينا أن ننبذ وصف الحالات الفردية كحالات واقعية في الزمان والمكان ، ونحتم علينا أن نستحدث قوانين لها طابع إحصائي . هذه هي الخطوط الرئيسية لعلم الطبيعة الكمي .

وعندما بدأنا — فيما سبق — دراسة ظواهر طبيعية جديدة كالمجال الكهرومغناطيسي ومجال الجاذبية حاولنا — في عبارات هامة عامة — شرح الخواص الرئيسية للمعادلات التي صيغت فيها العقائد والآراء رياضياً . وسنحاول الآن عمل نفس الشيء في الطبيعة الكمية مشيرين باختصار إلى أعمال بوهر ودي بروجلي وشردينجر وهيزنبرج وديراك وبورن .

لنعتبر حالة كهرب واحد . وقد يكون الكهرباء تحت تأثير مجال كهرومغناطيسي خارجي أو قد لا يؤثر عليه أي مؤثر خارجي . وربما تحرك مثلاً في مجال نواة ذرة ما أو ربما سقط على بللورة وحاد عنها . وترشدنا الطبيعة الكمية إلى كيفية صياغة المعادلات الرياضية الخاصة بكل من هذه الموضوعات .

وقد سلمنا الآن بالتشابه الموجود بين وتر متذبذب أو غشاء طبلية أو آلة هوائية أو أي آلة صوتية أخرى من جانب وبين الذرة المشعة من جانب آخر . وهناك أيضاً بعض التشابه بين المعادلات الرياضية المتحركة في المسائل الصوتية وبين تلك المتحركة في موضوع الطبيعة الكمية . ولكن التفسيرات الطبيعية للكميات المعينة في هاتين الحالتين تختلف كثيراً عن بعضها ، فالكميات الطبيعية التي تصف حركة البوتر المتذبذب تختلف تماماً عن تلك التي تصف الذرة المشعة ، رغمًا عما يبدو من تشابه ظاهري في المعادلات . ويمكننا أن نسأل في حالة الوتر عن مقدار ايتعاد

نقطة ما على الوتر المتحرك في لحظة معينة عن وضعها الأصلي . وإذا عرفنا شكل الوتر المتذبذب عند لحظة معلومة فإننا نستطيع الحصول على ما نريد . وإذن يمكننا تقدير قيمة الانحراف عن الوضع الأصلي عند لحظة ما من المعادلات الرياضية للوتر المتذبذب ، ونستطيع الآن التعبير عن توقف انحراف القوس عن موضعه الأصلي لكل نقطة من نقط القوس على الوجه التالي : عند لحظة ما يكون الانحراف عن الوضع العادى دالة تتوقف على إحداثيات القوس . وتكون جميع نقط القوس متصلاً ذا إحداثى واحد ؛ ويكون الانحراف دالة تُعرف في هذا المتصل ذى الإحداثى الواحد — وتقدر قيمتها من معادلات القوس المتذبذب .

وبالمثل في حالة الكهرب توجد دالة معينة لكل نقطة من نقط الفراغ عند أية لحظة ، وسنسمى هذه الدالة موجة الاحتمال . وتشير موجة الاحتمال — في مقارنتنا — إلى الانحراف عن الوضع العادى في المسألة الصوتية . أى أن الموجة الاحتمالية — عند لحظة ما — هي دالة في فضاء ذى ثلاثة إحداثيات ، بينما كان الانحراف في حالة الوتر عند لحظة ما دالة في فضاء ذى إحداثى واحد . وتحمل الموجة الاحتمالية في ثناياها كل ما نستطيع الحصول عليه من المعلومات الخاصة بالمجموعة الكمية التى ندرسها ، ونستطيع بواسطتها الإجابة على كل الأسئلة ذات الصبغة الإحصائية التى تتعلق بتلك المجموعة . ولكنها لن تكون بذات فائدة إذا أردنا منها تعيين مكان وسرعة الكهرب عند لحظة ما ، لأنه ليس هناك أى معنى لثل هذا السؤال في الطبيعة الكمية . ولكنها ستخبرنا عن احتمال العثور على الكهرب في مكان ما أو أين نتاح لنا فرصة العثور على الكهرب . ولا تشير التجربة إلى فرد بل إلى تجارب كثيرة متكررة . أى أن معادلات الطبيعة الكمية تعين لنا الموجة الاحتمالية تماماً كما تعين لنا معادلات ماكسويل المجال الكهرمغناطيسى ، وأيضاً كما تعين معادلات الجاذبية مجال الجاذبية . ولكن الكميات الطبيعية التى تعينها معادلات الطبيعة الكمية ليست ذات معان مباشرة كما هي الحال في معادلات المجالات الكهرمغناطيسية والجاذبية ، إذ أنها تعطينا فقط الطرق الرياضية للاجابة على أسئلة ذات طابع إحصائى .

وكنا حتى الآن معنيين بدراسة حركة الكهرب في مجال خارجي معين . فإذا اعتبرنا جسماً آخر له شحنة أكبر تحملها كتلة تبلغ ملايين المرات ضعف كتلة الكهرب فإننا نستطيع أن نفرض النظر عن نظرية الكم بأسرها وندرس المسألة طبقاً لقوانين الطبيعة الكلاسيكية . فإذا تكلمنا عن التيارات الكهربائية داخل الأسلاك ، أو موصلات مشحونة ، أو الأمواج الكهرومغناطيسية فإننا يمكننا تطبيق مبادئ علم الطبيعة البسيطة التي تتضمنها معادلات ماكسويل ، ولكننا لا نستطيع عمل ذلك عند ما نتكلم عن الظاهرة الكهروضوئية أو شدة خطوط الطيف . أو النشاط الإشعاعي أو حيود الموجات الكهربائية (الإلكترونية) وظواهر عديدة أخرى يظهر فيها الطابع الكمي للمادة والطاقة . فبينما كنا نتكلم عن مواضع وسرع جسيم واحد في الطبيعة الكلاسيكية إذا بنا نرى أنه يجب علينا الآن أن نعتبر أمواج الاحتمال في متصل ذي ثلاثة أبعاد خاص بهذا الجسيم وحده . وتتميز الطبيعة الكمية بطريقة خاصة في معالجة موضوع ما إذا علمنا كيفية دراسته من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية .

وللجسيم الأولى — سواء أكان كهربياً أو فوتوناً — أمواج احتمال تنتشر في متصل ذي ثلاثة أبعاد وتمطينا الخواص الإحصائية إذا تكررت التجربة مرات عديدة . ولكن ماذا نظن بجسيمين متفاعلين — بدلا من حالة الجسيم المنفرد التي كنا ندرسها — ككهرين أو كهرب وفوتون أو كهرب ونواة ؟ إن نستطيع دراسة كل على حدة ووصفها بواسطة موجة احتمال في ثلاثة أبعاد فقط بسبب تفاعل الجسيمين معاً . وفي الحقيقة أنه ليس من المسير علينا أن نصف مجموعة مكونة من جسيمين متفاعلين في الطبيعة الكلاسيكية . لذلك يجب علينا أن ندير وجوهنا هنيهة شطر الطبيعة الكلاسيكية . يتميز موضعا نقطتين ماديتين في الفراغ عند لحظة ما بستة أرقام ، ثلاثة منها لكل من النقطتين . وتكون كل الأوضاع الممكنة للنقطتين الماديتين متصلا ذا ستة أبعاد — لا ثلاثة — كما كانت الحال عند دراسة جسيم واحد . فإذا أرجعنا البصر ثانية إلى الطبيعة الكمية فإننا نحصل على أمواج احتمال في متصل ذي ستة أبعاد ، لا ثلاثة كما هي الحال عند دراسة

حركة جسيم واحد . وكذلك الحال إذا درسنا ثلاثة أو أربعة جسيمات أو أكثر حيث تكون أمواج الاحتمال دوالاً في متصلات ذات تسعة أو إثني عشر بعداً أو أكثر .

ونرى من هذا بسهولة أن أمواج الاحتمال ليست سوى أمواجاً مجردة ، تختلف عن الأمواج الكهرمغناطيسية والجاذبية التي توجد وتنتشر في فضاءنا ذي الأبعاد الثلاثة . ويعتبر المتصل ذو الأبعاد العديدة أساساً لأمواج الاحتمال . ويكون عدد أبعاد هذا المتصل مساوياً لعدد أبعاد فضاءنا العادي عند دراسة جسيم مادي واحد أى ثلاثة أبعاد . والمعنى الطبيعي الوحيد لموجة الاحتمال هو أنها تمكّننا من الإجابة على أسئلة إحصائية ذات فائدة كبيرة في حالة جسيم واحد أو جسيمات كثيرة . فمثلاً في حالة الكهرباء الواحد ، يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهرباء في مكان ما ، وفي حالة جسيمين يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهريين في مكانين معينين عند لحظة ما ؟

وقد كان أول انحراف لنا عن وجهة النظر الكلاسيكية هو في نبذنا لوصف الحالات الفردية كأحداث في الزمان والمكان . وقد كنا مضطرين إلى استخدام الطريقة الإحصائية بواسطة أمواج الاحتمال ، وحيث أننا اخترنا هذا الطريق فقد أصبح لزاماً علينا أن نمضى قدماً نحو التجريد المطلق ، وأصبح لا مفر من استخدام أمواج الاحتمال ذات الأبعاد العديدة لوصف مسائل الجسيمات العديدة .

دعنا على سبيل الاختصار نطلق على كل شيء ما عدا الطبيعة الكمية ، اسم الطبيعة الكلاسيكية . فهناك إذن اختلاف جوهري بين الطبيعة الكلاسيكية وبين الطبيعة الكمية ، إذ أن الطبيعة الكلاسيكية تهتم بوصف الأجسام الموجودة في المكان ووضع قوانين لتمثل تغيرها مع الزمن . ولكن الظواهر التي تكشف لنا عن الطابع الجسيمي والوحي للمادة والإشعاع ، والطابع الإحصائي للأحداث الأولية مثل التفكك الإشعاعي والحيود وإشعاع الخطوط الطيفية وغير ذلك اضطرتنا إلى نبذ هذا الرأي . فالطبيعة الكمية لا تهتم بوصف أجسام فردية ذات أوضاع معينة ودراسة تغيراتها مع الزمن ، فلن نجد في الطبيعة الكمية عبارات

مثل « هذا الجسم هو كذا وله من الصفات كذا وكذا » بل ترى عبارات مثل « كذا وكذا تمثل الاحتمال بأن يكون الجسم الفردى هو كذا وكذا وأن تكون له هذه الصفة أو تلك » . فلا توجد في الطبيعة الكمية قوانين تتحكم في تغيرات خواص الجسم مع الزمن . فبدلاً من ذلك نجد قوانين تعين تغير الاحتمال مع الزمن وهذه التغيرات الرئيسية — التي أدخلتها نظرية الكم في علم الطبيعة — هي التي مكنتنا من إيجاد شروح مقبولة وافية للخواص المتقطعة وللطابع الاحصائي للأحداث في علم الظواهر التي تلعب فيها الكمات الأولية للمادة والإشعاع أدواراً كبيرة .

ومع ذلك فما زالت هناك بعض مسائل صعبة لم يتم حلها بعد . وسنذكر هنا فقط بعضاً من هذه المسائل ، فالعلم لم يكن ولن يكون أبداً كتاباً مغلقاً ، إذ أن كل تقدم مهم يؤدي إلى بحث مسائل جديدة وكل تطور جديد تصحبه دائماً مصاعب جديدة .

وقد رأينا أنه في الحالة البسيطة التي نعتبر فيها جسيماً واحداً لا أكثر ، نستطيع الانتقال من الدراسة الكلاسيكية إلى الدراسة الكمية ، أى من دراسة حركة الجسيمات في الزمان والمكان إلى دراسة أمواج الاحتمال . ولا شك أن معتقدات المجال المهمة في الطبيعة الكلاسيكية لم تغب عن بالنا ، ولعلنا نتساءل عن كيف نستطيع وصف التفاعل بين كمات المادة الأولية والمجال ؟ وإذا كنا نحتاج إلى موجة احتمالية تنتشر في متصل ذي ثلاثين بعداً لدراسة حركة عشرة جسيمات ، فإنه يلزمنا موجة أخرى تنتشر في متصل ذي عدد لا نهائى من الأبعاد لدراسة المجال طبقاً للنظرية الكمية ، والانتقال من فكرة المجال في النظرية الكلاسيكية إلى الموجة الاحتمالية الملائمة في الطبيعة الكمية أمر في غاية الصعوبة . ويمكننا أن نقول أن جميع المحاولات التي بذلت للانتقال من الوصف الكلاسيكي إلى الوصف الكمى للمجال حتى الآن لا تعتبر وافية بالغرض . وهناك مسألة أخرى أساسية . فقد استخدمنا أثناء دراستنا لطريقة الانتقال من الطبيعة الكلاسيكية إلى الطبيعة الكمية الطريقة القديمة غير النسبية التي لا يعتبر فيها الزمن بنفس الطريقة التي

يعتبر بها المكان . فإذا حاولنا أن نبدأ بالوصف الكلاسيكي الذي تطبق فيه قواعد نظرية النسبية فإن انتقالنا إلى الطريقة الكمية يصبح أكثر تعقيداً . وهذه هي معضلة اليوم التي حاول علم الطبيعة الحديث حلها ولكن هذا الحل ما زال بعيداً عن الكمال . وهناك أيضاً معضلة أخرى نشأت عند ما حاول العلماء وضع نظريات وقواعد كمية لوصف الجسيمات الثقيلة التي تدخل في تركيب النوى . وعلى الرغم من النتائج العملية العديدة والمحاولات الكثيرة لشرح مشاكل النواة ، فإننا ما زلنا نجهل أهم نواحي هذا الموضوع .

وليس هناك ثمة شك في أن الطبيعة الكمية قد نجحت في شرح جانباً كبيراً من الحقائق وكانت النتائج النظرية في معظم الحالات متفقة تماماً مع النتائج العملية . وقد أبعدتنا الطبيعة الكمية الحديثة كثيراً عن وجهة النظر الميكانيكية القديمة وأصبح التمهقر إلى مواضعنا القديمة أمراً بعيد الاحتمال . ولكن ليس هناك شك أيضاً في أنه يجب علينا أن نبني علم الطبيعة الحديث على أساس معتقدات المادة والمجال . وفي هذه الحالة تكون النظرية ثنائية وبعيدة عن فكرة إرجاع كل شيء ونسبته إلى المجال .

هل ستسلك التطورات المقبلة نفس الطريق الذي سلكته الطبيعة الكمية ؟ أو هل يحتمل أن تنشأ أفكار ثورية جديدة في علم الطبيعة ؟ وهل سيعاني طريق التقدم انحناءة أخرى كبيرة كما حدث ذلك مرات فيما مضى ؟

وقد تركزت جميع معضلات الطبيعة الكمية حول بضع نقط رئيسية قليلة خلال السنوات الأخيرة ، وينتظر علم الطبيعة حل هذه المعضلات بقلق ، وليس هناك ما يدلنا على الكيفية أو الوقت الذي ستحل فيه هذه المشاكل .

علم الطبيعة ومفارقة الوجود :

ما هي النتائج العامة التي نستطيع استخلاصها من تطور علم الطبيعة الذي بسطناه هنا بطريقة عامة توضح لنا خطوطه الرئيسية فقط ؟
وليس العلم مجرد مجموعة قوانين أو قائمة بحقائق غير مرتبطة بل هو ابتكارات

العقل الإنسانى بما فيه من معتقدات وأفكار نتيجة تفكير حر طليق .
وتحاول النظريات الطبيعية تكوين صورة للحقيقة وإيجاد رابطة بينها وبين عالم
الشعور . وإذن تكون التزكية الوحيدة لتركيب عقد لنا هى فيما إذا كانت نظرياتنا
هذه تنجح فى إيجاد هذه العلاقة وفى الكيفية التى وجدت بها .

وقد رأينا حقائق جديدة نشأت عن التقدم فى علم الطبيعة ، ولكن اكتشاف
الحقائق لم يكن مقصوراً على علم الطبيعة ، إذ أن الإنسان قد بدأ منذ فجر التاريخ
فى تمييز ما حوله من الأجسام . فالصور التى كونها العقل الإنسانى عن الشجرة
والحصان والجسم المادى نتجت عن التجربة على الرغم من أن التأثيرات التى نتجت
عنها هذه الصور أولية بالنسبة لعالم الطواهر الطبيعية . والقطعة التى تحاور فأراً
تكون فى نفسها صورة خاصة بذلك . وحيث أن القطعة تعامل كل فأر بنفس
الطريقة فإننا نستنتج أنها لا بد كوت فى نفسها صوراً وطرقاً هى أدلتها فى تأثرها
بالحياة الخارجية .

وطبيعى أن ثلاثة أحجار شئ^١ مختلف عن شجرتين ، وشجرتين شئ^٢ مختلف
عن حجرين وليست فكرة الأرقام البحتة ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥٠٠ (دون أى ارتباط
بالأشياء التى نميزها) سوى من ثمار التفكير الإنسانى لوصف حقيقة عالمنا .

وبفضل شعورنا الباطنى بمرور الزمن استطعنا تنظيم إحساساتنا لكى نتمكن
من الحكم على أن حدثاً ما قد سبق آخراً ، ولكن لكى نميز كل لحظة زمنية بمر
برقم بواسطة استخدام ساعة أى لكى نعتبر الزمن متصلاً ذا بعد واحد هو أيضاً
فى حد ذاته اختراع للذهن الإنسانى . وكذلك الحال فى معتقداتنا الهندسية
الإقليدية واعتبار فضائنا كعالم ذى ثلاثة أبعاد .

وقد بدأ علم الطبيعة حقاً باختراع الكتلة والقوة والجموعة القاصرة . وهذه
جميعها ابتكارات للعقل الإنسانى أدت إلى نشوء وجهة النظر الميكانيكية . ويتكون
العالم الخارجى ، من وجهة نظر العلماء الطبيعيين فى أوائل القرن التاسع عشر ، من
جسيمات تؤثر عليها قوى بسيطة تتوقف على المسافة . وقد حاول هؤلاء العلماء
التمسك بفكرة إمكانهم شرح جميع أحداث الطبيعة على أساس هذه الفروض

الأساسية . ولكن الصعوبات المتعلقة بانحراف الإبرة المغناطيسية ، وتركيب الأثير دفعتنا إلى بناء عالم أكثر تعقيداً . وقد أدى ذلك إلى الاكتشاف المهم للمجال الكهرمغناطيسي وقد احتجنا إلى خيال علمي جرى لنذكر تماماً أنه ليست الأجسام المادية ولكن ما يوجد بينها — أى المجال — قد يكون عاملاً أساسياً لتنظيم وفهم الأحداث .

وقد أدت تطورات العلم الحديث إلى القضاء على المعتقدات القديمة واستحداث أخرى جديدة . فقد قضت نظرية النسبية على فكرة الزمن المطلق والمجموعة الإحداثية القاصرة . ولم يعد مسرح الحوادث هو متصل الفضاء ذي الثلاثة الأبعاد والزمن ذو البعد الواحد ، بل أصبح هو متصل المكان والزمان ذو الأربعة الأبعاد الذى تختلف قوانين تحويله عن القوانين القديمة . ولم نعد نحتاج إلى المجموعة الإحداثية القاصرة إذ أصبحت كل المجموعات الإحداثية سواء وتعتبر جميعها مناسبة لوصف أحداث الطبيعة .

وقد استحدثت نظرية الكم أيضاً آراء ومعتقدات جديدة وأساسية فقد استبدلت فكرة عدم الاتصال بالاتصال وظهرت قوانين الاحتمال بدلا من القوانين التى تتحكم فى حركة الأجسام الفردية .

وفى الحقيقة أن الآراء التى استحدثت فى علم الطبيعة الحديث تختلف عن تلك التى شاعت عند بدء التطور العلمى . ولكن هدف النظريات العلمية كان وما زال ثابتاً لم يتغير .

وتساعدنا النظريات الطبيعية على تلمس طريقنا وسط جموع الحقائق العلمية محاولين تنظيم وتفهم عالمنا الإحساسى . ونود دائماً فى أن تتبع الحقائق العملية نتائج النظريات والآراء الموضوعية . لن يكون هناك وجود للعلم إذا لم نعتقد أننا نستطيع اكتشاف الحقائق بواسطة نظرياتنا الموضوعية ، وإذا لم نكن نعتقد فى تركيب العالم على أساس دقيق منظم . وستظل هذه العقائد دائماً الدوافع الأساسية لجميع الاستحداثات العلمية . وفى جميع مجهوداتنا وكفاحنا بين الآراء القديمة

والحديثه نلمس الحاجة الملحة للفهم والإدراك العميق لنظام العالم الدقيق ، هذا الإدراك الذى يزداد وثوقاً وقوة بما نقابله من الصعاب .

المقدمة :

تدفعنا الحقائق العملية الكثيرة فى عالم الظواهر الذرية مرة أخرى إلى وضع نظريات طبيعية حديثة . وتتميز المادة بتركيب حبيبي إذ تتركب من جسيمات أولية تسمى بالكلمات الأولية للمادة . أى أن الشحنة الكهربائية تتميز بتركيب حبيبي وكذلك الطاقة أيضاً ، وذلك هو الأهم من وجهة نظر نظرية الكم . ويتكون الضوء من كمات الطاقة المسماة بالفوتونات .

هل يتكون الضوء من موجات أو من سيل من الفوتونات ؟ وهل يتكون الشعاع الإلكتروني من سيل من الكهارب أم من موجات ؟ هذه هى الأسئلة التى فرضت على علم الطبيعة كنتيجة للتجارب العملية . ولكى نحاول الإجابة على هذه الأسئلة يجب أن نترك جانباً وصف الأحداث الذرية كحوادث فى المكان والزمان ، إذ يجب أن يزداد تحررنا من قيود النظرية الميكانيكية القديمة ويضع علم الطبيعة الكمى لنا قوانين تتحكم فى الجموع لا الأفراد . فنحن نتكلم عن الاحتمالات وعن القوانين التى تتحكم فى تغيرها مع الزمن بالنسبة لجموع كبيرة من الأفراد لا عن القوانين التى تصف حركة الأجسام الفردية المستقبلية ، كما هى الحال فى قوانين الميكانيكا غير الكمية .

مطبعة الرسالة
شارع حمودة القناوي ٢ عابدين

Bibliotheca Alexandrina



0405929